

Interaktionsverhalten von Geokunststoff und Erdstoff bei statischen und zyklischen Beanspruchungen

D i s s e r t a t i o n
zur Erlangung des Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Axel Nernheim
aus Kiel

genehmigt von der
Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung
24. Juni 2005

Vorsitzender der Promotionskommission:

Prof. Dr.-Ing. O. Langefeld

Hauptberichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. N. Meyer

Berichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. H. Klapperich

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geotechnik und Markscheidewesen der Technischen Universität Clausthal. Sie war Teil eines Forschungsvorhabens zum besseren Verständnis des Tragverhaltens geokunststoffbewehrter Konstruktionen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. N. Meyer für die Anregung zu dieser Arbeit und für seine ständige Unterstützung und die vielen gemeinsamen Diskussionen.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Klapperich danke ich für die freundliche Übernahme des Koreferates und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. O. Langefeld für die bereitwillige Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Weiterhin möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Institutes für Geotechnik und Markscheidewesen der TU Clausthal bedanken. Dies gilt insbesondere für meine langjährige Kollegin und Freundin, Frau Dipl.-Ing. A. Richwien, für stete Gesprächsbereitschaft und gute Zusammenarbeit, Herrn Dipl.-Ing. F. Bussert für zahlreiche Fachdiskussionen und Herrn M. Herrmann für die optimale technische Umsetzung meiner Ideen. Weiterer Dank gilt den Diplomanden und studentischen Hilfskräften für ihre wertvolle Unterstützung bei der Umsetzung des Untersuchungsprogrammes. Frei von jeglicher Wertigkeit möchte ich sie hier in alphabetischer Reihenfolge nennen: Dipl.-Ing. A. Emersleben, Dipl.-Ing. A. Graupner, B. Holm, J. Kirchner, S. Mahr, Dipl.-Ing. M. Tazl.

Außerdem danke ich den Förderern der Forschungsmaßnahme, den Firmen Huesker Synthetic GmbH & Co. KG, Gescher, Tensar International GmbH, Bonn, Naue Fasertechnik GmbH & Co. KG, Lübbecke. und Colbond Geosynthetics GmbH, Obernburg.

Darüberhinaus möchte ich meinen Freunden für die interdisziplinären Inspirationen, aber auch zusätzliche Motivation bedanken, die sie mir auf vielen gemeinsamen Reisen und Unternehmungen geschenkt haben.

Schließlich und ganz besonders möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir durch ihre tatkräftige Unterstützung und Rücksichtnahme während der gesamten Zeit sehr geholfen haben.

Clausthal, im Juni 2005

Axel Nernheim

Zusammenfassung

Stichworte: Geokunststoff, zyklische Beanspruchung, Pull-Out-Versuch, Verankerungslänge

Geokunststoffe werden beim Einsatz in Stützkonstruktionen, Erdfallüberbrückungen oder Brückenwiderlagern neben statischen Einwirkungen auch zyklisch-dynamischen Einwirkungen aus Verkehr, Maschinen oder Baubetrieb ausgesetzt. Im Rahmen des Nachweises der inneren Standsicherheit werden in diesen Konstruktionen detaillierte Kenntnisse des Interaktionsverhaltens zwischen Erdstoff und Bewehrungsmaterial im Verankerungsbereich gefordert. Zum Verhalten unter zyklisch-dynamischen Belastungen liegen aber bisher nur unzureichende Erfahrungen vor.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst ein zielführendes Versuchskonzept und ein standardisierter zyklischer Versuchsablauf zur Bearbeitung der Problematik entwickelt. Zu dessen Umsetzung erfolgte die Planung und Konstruktion eines neuartigen, multifunktionalen Versuchsstandes und Messsystems zur Durchführung großmaßstäblicher statischer und zyklischer Auszugsversuche.

In über 55 statischen Index- und Modellversuchen wurden als Kernparameter für die maximale Auszugskraft die Kornverteilung und Lagerungsdichte des Erdstoffes, die Einbindelänge der Bewehrung und die Auflast identifiziert, während für die Verschiebungsentwicklung im Wesentlichen die Einbindelänge und die Auflast relevant sind. Die Abschätzung der Lastabtragung und Kraftentwicklung im Bewehrungsmaterial ist bei Kenntnis einer Kraft-Dehnungs-Beziehung und der gemessenen Dehnungen im Probenmaterial möglich. Die überwiegende Lastabtragung erfolgt bei den untersuchten Gitterstrukturen über Mechanismen vor den Querstreben wie „passiver Erdwiderstand“ und „Interlock“.

In mehr als 80 zyklischen Modellversuchen wurden als maßgebende zyklische Einflussparameter das Oberlastniveau und die Amplitude der Lastspiele sowie die Lastspielzahl extrahiert. Eine Zunahme der Verschiebungen war mit steigender Lastspielzahl zu beobachten, wobei aber ein sicherheitsgefährdendes plötzliches Versagen bei Gitterstrukturen aufgrund der Lastabtragungskomponenten nicht beobachtet werden konnte. Die Lastabtragung zyklischer Modellversuche erweist sich im Vergleich zu den entsprechenden statischen Referenzversuchen als gleichmäßiger, da während der Aufbringung der Lastspiele eine Lastumlagerung in hintere Verankerungsbereiche vollzogen wird. Eine Verbesserung des Verbundverhaltens nach Aufbringung der Lastspiele aufgrund von Bodenverdichtungseffekten und einer „zyklischen Bodenverspannung“ wurde ebenfalls beobachtet.

Die Datenbasis wurde zur Entwicklung einer Methodik der stufenlosen Ermittlung zyklischer Verformungen in Abhängigkeit der Amplitude und des Oberlastniveaus der zyklischen Belastung sowie der Lastspielzahl herangezogen. Dabei ergaben sich geringfügige Unterschiede zwischen den untersuchten Bewehrungsmaterialien und Erdstoffen. Verformungsnetzte verdeutlichen die Wirkung der maßgebenden Einflussparameter visuell. Um aus den verformungsbasierten Daten eine Aussage zum Grenzverhaltens des Systems ableiten zu können, erfolgte die Definition eines Versagenskriteriums. Damit lässt sich verformungsabhängig konkret ermitteln, ob eine Verankerung ein stabiles Verhalten aufweist oder Versagenstendenzen zeigt.

Aus den vorgestellten Versuchsergebnissen wurde ein allgemeingültiges Konzept zur Bemessung des Verankerungsbereiches zyklisch beanspruchter Konstruktionen entwickelt. Es werden ein Nomogramm- und ein analytisches Verfahren zur Verfügung gestellt, mit denen bei bekannten Einwirkungen eine optimale zyklische Verankerungslänge für jede Bewehrungslage einer geokunststoffbewehrten Konstruktion ermittelt werden kann. Eine Implementierung dieses Ansatzes in ein vorhandenes Bemessungskonzept ist möglich und wird an einem Beispiel exemplarisch gezeigt.

Abstract

Keywords: Geosynthetic, cyclic loading, pull-out test, compound behaviour, anchorage length

When used in reinforced structures, bridging of voids or abutments geosynthetics are exposed to static and cyclic loadings from traffic, machines and construction work. For the proof of internal stability in these structures detailed knowledge of the interaction behaviour between the geosynthetic and the surrounding soil in the anchorage area is required. No sufficient experience of the behaviour under cyclic loadings is available at the moment.

Initially an extensive experimental framework and a standardised cyclic testing procedure have been evaluated to investigate the behaviour of the materials. Therefore, the development and construction of a new, multifunctional testing device and measuring system has been carried out to perform large scale static and cyclic pull-out tests.

In more than 55 static index- and model tests the grain size distribution, density of the soil, embedment length of the geosynthetic and the vertical surcharge have been identified as core parameters for the maximum pull-out force. However, for the development of displacements in the geosynthetic specimen, embedment length and surcharge are relevant. Knowledge of the force-elongation-relation of the geosynthetic and the measured elongations in the embedded specimen allows an estimation of the load transference from the geosynthetic in the soil and the development of forces in the specimen. "Passive earth resistance" and "interlock" in front of the transverse bars are the prevailing mechanisms of load transference with grid structures.

In more than 80 cyclic model tests the maximum cyclic load, the amplitude of the cyclic loading and the number of cycles are identified as core parameters. An increase of displacements of the specimen is concomitant with an increasing number of applied cycles. Nevertheless, a hazardous sudden failure was not detected with the grid structures due to their load transference mechanisms. Load transference of cyclic model tests seems to be more constant over the embedment length than in the static reference tests. This can be explained by a distinctive load transfer in the rear part of the specimen. An improvement of the compound behaviour after application of the cycles due to a "compaction of the soil" and a "cyclic interlock" is monitored.

The database is used for the development of a universal methodology to calculate displacements of the structures depending on the amplitude of the cycles and the maximum cyclic loading. Thereby slight differences are monitored with different geosynthetics and soils. The effects of the core parameters on the displacement behaviour are illustrated by displacement grids. A failure criterion is defined to extract a prediction of the limit state behaviour of the structure from the displacement-based data. By applying this methodology, a prediction of a stable behaviour or a failure of the specimen is possible.

Based on the presented experimental data, a universal concept for the calculation of the anchorage area of cyclic loaded structures is developed. A nomogram and an analytical method are given with which the optimal cyclic anchorage length can be determined for every layer of a reinforced structure. An implementation of this approach into a given concept is possible and is applied to a sample.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Verwendung von Geokunststoffen	1
1.2	Interaktion von Geokunststoff und Erdstoff	2
1.3	Dynamische Einwirkungen	3
1.4	Aufgabenstellung und Zielsetzung der Arbeit	4
1.5	Gliederung der Arbeit	4
2	Bisheriger Kenntnisstand	6
2.1	Einleitung	6
2.2	Übersicht über geokunststoffbewehrte Konstruktionen	6
2.2.1	Bewehrungsfunktion von Geokunststoffen	6
2.2.2	Anwendungsgebiete geokunststoffbewehrter Konstruktionen	7
2.2.3	Wirkungsweise bewehrter Stützkonstruktionen	9
2.2.4	Verankerung von Geokunststoffen	11
2.3	Einwirkungen auf geokunststoffbewehrte Konstruktionen	12
2.3.1	Einwirkungsarten	12
2.3.2	Berücksichtigung zyklischer Einwirkungen bei der Bemessung	15
2.4	Verbundverhalten von Boden und Bewehrung	16
2.4.1	Ermittlung der Grenzflächenscherfestigkeit	16
2.4.2	Direkter Scherversuch	18
2.4.3	Auszugsversuch	19
2.4.3.1	Auszugswiderstand und Lastabtragung	20
2.4.3.2	Auswertung statischer Versuche	21
2.4.3.2.1	Einführung	21
2.4.3.2.2	Auflast und Dilatanz	21
2.4.3.2.3	Einbaudichte	24
2.4.3.2.4	Bodeneigenschaften und Bewehrungsart	25
2.4.3.2.5	Bewehrungsbreite und Wandreibung	27
2.4.3.2.6	Einbindelänge der Bewehrung	28
2.4.3.2.7	Schichtdicke des eingebauten Erdstoffes	29
2.4.3.2.8	Auszugsgeschwindigkeit	29
2.4.3.2.9	Konstruktion der Frontwand	30
2.4.3.2.10	Klemmung	31
2.4.3.3	Auswertung zyklischer Versuche	32
2.4.3.3.1	Einführung	32
2.4.3.3.2	Vertikal zyklische Belastung	32
2.4.3.3.3	Horizontal zyklische Belastung	33
2.4.3.3.4	Kombinierte zyklische Belastungen	38
2.4.3.4	In-Situ Auszugsversuche	38
2.4.3.5	Eignung des Auszugsversuches	39
2.4.4	Zyklische Versuchsvarianten	40
2.5	Langzeitverhalten	41
2.5.1	Langzeitverhalten in statischen In-Air-Untersuchungen	41
2.5.2	Langzeitverhalten in statischen In-Soil-Untersuchungen	42
2.5.3	Langzeitverhalten in zyklischen In-Air-Untersuchungen	44
2.5.4	Langzeitverhalten in zyklischen In-Soil-Untersuchungen	46
2.6	Forschungsbedarf	46

3 Grundlagen des eigenen Untersuchungsprogramms.....	47
3.1 Einleitung	47
3.2 Entwicklung des Pull-Out-Versuchsstandes	47
3.2.1 Einführung	47
3.2.2 Pull-Out-Gerät	47
3.2.2.1 Übersicht.....	47
3.2.2.2 Versuchskasten	49
3.2.2.3 Einrieselanlage	50
3.2.2.4 Belastungseinrichtungen	52
3.2.3 Instrumentierung des Versuchsstandes	53
3.2.4 Datenerfassung	54
3.3 Versuchsmaterialien	55
3.3.1 Einführung	55
3.3.2 Erdstoffe	55
3.3.3 Geokunststoffe	56
3.3.4 Stahlgitter	59
3.3.5 Stahlblech.....	59
3.4 Versuchskonzeption für statische Index- und Modellversuche	59
3.4.1 Einführung	59
3.4.2 Beanspruchung	60
3.4.3 Einflussparameter zur Variation	60
3.4.4 Versuchsdurchführung	61
3.4.5 Versuchsprogramm	61
3.5 Versuchskonzeption für zyklische Modellversuche.....	62
3.5.1 Einführung	62
3.5.2 Beanspruchung	62
3.5.3 Einflussparameter zur Variation	64
3.5.4 Versuchsdurchführung	65
3.5.5 Versuchsprogramm	66
4 Ergebnisse der statischen Index- und Modellversuche.....	67
4.1 Einführung.....	67
4.2 Reproduktionsversuche und Horizontalkraftinkonsistenzen	67
4.3 Einfluss des Bewehrungsmaterials	68
4.3.1 Art des Bewehrungsmaterials.....	68
4.3.2 Einbindelänge des Bewehrungsmaterials	70
4.4 Einfluss des Erdstoffes.....	72
4.4.1 Art des Erdstoffes	72
4.4.2 Einbaudichte des Erdstoffes.....	74
4.5 Einfluss der Auflast	75
4.6 Lastabtragungsverhalten der Bewehrungsmaterialien.....	79
4.6.1 Einführung	79
4.6.2 Inkonsistenzen der Horizontalkraft	79
4.6.3 Verschiebungsentwicklung.....	81
4.6.4 Ermittlung der Materialdehnungen	83
4.6.5 Lastabtragung über die Querstreben.....	86
4.7 Allgemeingültige Verformungsermittlung statischer Auszugsversuche.....	87
4.8 Zusammenstellung der Referenzversuche	88
4.9 Erkenntnisse aus den statischen Versuchsreihen	90

5	Ergebnisse der zyklischen Modellversuche	92
5.1	Einführung	92
5.2	Generelle Datendarstellung	92
5.2.1	Datenaufbereitung	92
5.2.2	Darstellungsform	93
5.2.3	Bezug auf den statischen Referenzversuch	94
5.3	Reproduktionsverhalten	95
5.4	Einfluss des Bewehrungsmaterials	95
5.4.1	Art des Bewehrungsmaterials	95
5.4.2	Einfluss der Einbindelänge	96
5.5	Einfluss des Erdstoffes	97
5.6	Einfluss der Auflast	98
5.7	Einfluss von Belastungsparametern	98
5.7.1	Einfluss des Lastniveaus	98
5.7.2	Einfluss der Amplitude	100
5.7.3	Einfluss der Frequenz	102
5.7.4	Einfluss der Lastspielzahl	103
5.8	Lastabtragungsverhalten der Bewehrungsmaterialien	104
5.8.1	Einführung	104
5.8.2	Probenaktivierung	104
5.8.3	Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Probe unter zyklischer Belastung	106
5.8.4	Verfahren zur Abschätzung der Kräfte in der Probe	108
5.8.5	Auswertung des statischen Anschlussherausziehens	110
5.9	Extrahierung von Kernaussagen	113
6	Entwicklung einer Auswertemethodik für zyklische Modellversuche	115
6.1	Einführung	115
6.2	Entwicklung der statischen Verschiebungen in der Phase 1	115
6.2.1	Verifizierung der Versuchsdaten	115
6.2.2	Allgemeingültige Beschreibung der statischen Verschiebungen	116
6.3	Entwicklung der zyklischen Verschiebungen in der Phase 2	117
6.3.1	Einführung	117
6.3.2	Allgemeine Regressionsanalyse	117
6.3.3	Zieldefinition der Auswertung	119
6.3.4	Beschreibung der zyklischen Verschiebungen	119
6.3.4.1	Wahl einer geeigneten Ansatzfunktion und Berechnungsmethodik	119
6.3.4.2	Überprüfung der Ergebnisqualität	120
6.3.4.3	Visualisierung der Ergebnisse	121
6.3.4.4	Besonderheiten bei einer Variation der Eingangsparameter	123
6.3.5	Allgemeingültige Beschreibung der zyklischen Verschiebungen	124
6.4	Ermittlung der Gesamtverschiebungen	125
6.4.1	Prognose der Gesamtverschiebungen	125
6.4.2	Visualisierung der Ergebnisse	126
6.4.3	Allgemeingültige Prognose der Gesamtverschiebungen	129
6.5	Entwicklung eines Kriteriums zur Definition des Versagens im zyklischen Modellversuch	130
6.5.1	Diskussion unterschiedlicher Versagenskriterien	130
6.5.2	Vorschlag eines modifizierten Versagenskriteriums	131
6.5.3	Überprüfung des vorgeschlagenen Versagenskriteriums	133

6.6	Entwicklung einer Methodik zur Extrapolation der Verschiebungen bei höheren Lastspielzahlen	134
6.6.1	Anwendungsbereiche einer Extrapolation	134
6.6.2	Prognose der Verschiebungen für höhere Lastspielzahlen	135
6.6.3	Definition von Prüfkriterien für die Prognose	136
6.6.4	Visualisierung der Verschiebungen für 10^5 Lastspiele	138
6.7	Diskussion und Bewertung der vorgestellten Auswertemethoden	140
7	Entwicklung eines Bemessungskonzeptes	142
7.1	Einführung	142
7.2	Entwicklung einer allgemeingültigen Versagensbeziehung	142
7.2.1	Parameter mit Einfluss auf das Versagensverhalten	142
7.2.2	Festlegung einer allgemeingültigen Versagensgrenze für die ausgeführten zyklischen Modellversuche	144
7.3	Entwicklung eines Verfahrens zur zyklischen Bemessung des Verbundverhaltens	146
7.3.1	Zielformulierung	146
7.3.2	Ermittlung der Versagensgrenze	147
7.3.3	Ermittlung der statischen Bezugsparameter	148
7.3.4	Hinweise zum Data Mining	151
7.3.5	Konstruktion eines Bemessungsnomogramms	153
7.3.6	Entwicklung eines analytischen Bemessungsverfahrens	155
7.3.7	Verifizierung der Allgemeingültigkeit des Verfahrens	157
7.3.7.1	Verifizierung variabler Einbindelängen	157
7.3.7.2	Verifizierung variabler Vertikalspannungen	158
7.4	Anwendung der Verfahren zur zyklischen Bemessung des Verbundverhaltens	159
7.4.1	Einführung	159
7.4.2	Anwendung des Nomogrammverfahrens	159
7.4.3	Anwendung des analytischen Bemessungsverfahrens	160
7.4.4	Allgemeine Bemessungsvorschläge	161
7.5	Bemessungsbeispiel	161
7.5.1	Eingangsparameter	162
7.5.2	Ansatz der statischen Verbundverhältnisse	163
7.5.3	Belastungsparameter	163
7.5.4	Bemessung	164
7.6	Zusammenfassung	167
8	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	168
8.1	Zusammenfassung	168
8.2	Ausblick	170
9	Summary	172
10	Literaturverzeichnis	174

Anhänge

- Anhang A: Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Kurzzeichen
- Anhang B: Detailinformationen zu den ausgewerteten Literaturquellen
- Anhang C: Grundlagen des Untersuchungsprogramms
- Anhang D: Auswertungen der statischen Modellversuche
- Anhang E: Auswertung der zyklischen Modellversuche
- Anhang F: Allgemeingültige Auswertemethodik
- Anhang G: Entwicklung eines Bemessungskonzeptes

1 Einführung

1.1 Verwendung von Geokunststoffen

Geokunststoffe werden in der heutigen Zeit in einer Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten im Bereich des Bauwesens und der Geotechnik verwendet. Zu den Geokunststoffen zählen Geotextilien mit ihren Untergruppen Geogewebe sowie Vliesen, Geogitter, Kunststoffdichtungsbahnen, Tondichtungsbahnen, Geonetze sowie Kombinationsprodukte aus verschiedenen Produktgruppen. Als Rohstoffe werden vorwiegend Polyethylen (PE), Polyamid (PA), Polypropylen (PP) und Polyester (PET/PES), aber auch Spezialmaterialien wie Aramide (AR) und Polyvinylalkohole (PVA) verwendet.

Wesentliche Funktionen, die von Geokunststoffen übernommen werden, sind: Drainieren, Filtern, Dichten, Verpacken, Erosionsschutz, Trennen, Schützen sowie Bewehren. Eine Kernfunktion stellt dabei die Bewehrungsfunktion dar: Durch die Einlage des Geokunststoffes ist es möglich, eine Verbundkonstruktion Boden – Geokunststoff zu schaffen, welche – vergleichbar mit dem Stahlbeton – Druck- und Zugkräfte aufnehmen kann. Die Idee, Erdstoff durch zugfeste Elemente aus pflanzlichen Produkten (Grassoden, Weidenruten), Metall (Stahlflachbänder) oder Kunststoffen zu stabilisieren, ist nicht neu. Sie wurde bereits im Altertum angewandt und in Frankreich seit Ende der 60er Jahre des vorigen Jahrhunderts unter dem Begriff „Terre Armée“ weiterentwickelt. Die Bewehrung bestand anfänglich aus schmalen verzinkten Stahlbändern, die Wandhaut aus Beton- oder Stahlfertigteilen. Die theoretischen Erklärungen zum Tragverhalten wurden hauptsächlich von Schlosser und Vidal geliefert (z.B. Schlosser und Vidal, 1969).

Die wachsende Akzeptanz, Kunststoffe für bewehrte Konstruktionen zu verwenden, spiegelt sich in stetig steigenden Absatzzahlen dieser Produkte seit Mitte der siebziger Jahre des vorigen Jahrhunderts wider (Koerner, 1999). Laut Marktstudien wird durch zunehmende Überzeugungsarbeit bezüglich der Vorteile der Bauweise und Fortbildung der Anwender eine weitere Absatzsteigerung zu erwarten sein (Geosynthetics: Market Research). Die Herstellungskosten im Bereich bewehrter Stützkonstruktionen liegen in der Regel deutlich unter denen vergleichbarer Varianten (Koerner, 1999).

Geokunststoffe werden heute in vielfältigen Bereichen in ihrer Funktion als bewehrendes Element eingesetzt: Bei bewehrten Stützkonstruktionen, Dämmen auf wenig tragfähigem Untergrund, bei der Tragschichtbewehrung im Eisenbahn- und Straßenbau, als bewehrtes Gründungspolster, im Deponiebau, als Erdfallsicherung sowie bei bewehrten Widerlagerkonstruktionen. Als wesentliches Merkmal dieser Funktion wird die Übernahme von Zugkräften

durch den Geokunststoff und die Übertragung in den Kontaktboden über Reibung und sonstige Mechanismen definiert.

Eine Bemessung dieser Konstruktionen erfordert die Kenntnis geeigneter Bemessungsverfahren, Materialkennwerte und -untersuchungsmethoden sowie eine exakte Darstellung der Interaktion zwischen dem Bodenmaterial und dem eingebetteten Geokunststoff. In dieser Arbeit wird ein Beitrag zur wirklichkeitsnahen Beschreibung dieser Interaktion unter ständigen und zyklischen Lasten geleistet.

1.2 Interaktion von Geokunststoff und Erdstoff

Die momentane Bemessungspraxis (EBGEO, BS 8006) sieht im Bereich der Tragfähigkeit eine Unterteilung der Nachweisführung bewehrter Konstruktionen in die äußere und die innere Standsicherheit vor, wobei bei der äußeren Standsicherheit die klassischen erdstatischen Nachweise Grundbruch, Verlust der Lagesicherheit und Gleiten an einem durch die Lage der Bewehrung vorgegebenen monolithischen Erdkörper geführt werden. Die innere Standsicherheit umfasst:

- den Nachweis gegen Bruch der Bewehrung,
- den Nachweis gegen Zugversagen von Anschlussverbindungen,
- und den Nachweis gegen Auszugsversagen des Geokunststoffes aus dem Boden.

Während es sich bei den erstgenannten Nachweisen um Testverfahren ohne Bodenkontakt handelt, wird der Widerstand gegen das Herausziehen des Geokunststoffmaterials im Bodenverbund überprüft. Es wird somit untersucht, ob die Verankerungslänge ausreicht, um die berechnete Zugkraft der Bewehrungslage in den Boden einzuleiten. Ein Auszugsversagen liegt dabei vor, wenn die Grenzflächenscherfestigkeit zwischen der Probe und dem Bodenmaterial erreicht wird. Als Grenzflächenscherfestigkeit wird das Erreichen eines Grenzspannungszustandes bei Schub in einer Grenzschicht zwischen zwei Materialien bzw. Lockergesteinen oder zwischen Lockergestein und Material bezeichnet (Batereau, 1982).

Das Verständnis der Ausbildung des Verbundwiderstandes unter verschiedenen Lasteinwirkungen ist existenziell für eine wirklichkeitsnahe Ermittlung der erforderlichen Verankerungslänge des Geokunststoffes im Bodenmaterial, beispielsweise eines Geogitters im rückhaltenden Teil einer bewehrten Stützkonstruktion. Diese Interaktion wird im Auszugsversuch von einer Vielzahl von Parametern aus folgenden Bereichen beeinflusst:

- Bodenspezifische Parameter,
- Bewehrungsspezifische Parameter,
- Belastungsspezifische Parameter,
- Versuchsspezifische Parameter.

Umfangreiche Studien einer Vielzahl von Autoren zeigen deutliche Unterschiede in den Versuchsergebnissen. Dieser Umstand ist auf die große Varianz der verwendeten Versuchsggeräte sowie Untersuchungsmethoden zurückzuführen. Erste Anstrengungen zu einer Vereinheitlichung der Versuchsrandbedingungen sind mit dem American Standard für Auszugsversuche (ASTM D 6706) und der DIN EN 13738 unternommen worden. Dadurch werden jedoch lediglich weggesteuerte, statische Versuchsreihen geregelt.

Weiterhin besteht aber der Bedarf, auch die Auswirkungen zyklischer Beanspruchungen auf das Interfaceverhalten zu untersuchen, da der weitaus überwiegende Teil der zur Zeit zur Verfügung stehenden Daten aus weggesteuerten, statischen Versuchsreihen stammt.

1.3 Zyklische Einwirkungen

Die Zugbelastung der Geokunststoffe wird durch dauerhafte Einwirkungen wie das Eigengewicht des Bodenmaterials sowie der auflagernden Konstruktion, aber auch durch nicht-ständige Einwirkungskomponenten wie Verkehrsbelastungen, Belastungen aus Verdichtung sowie Maschinen, induziert. Entsprechend ihrer zeitlichen Lastverläufe ist eine Unterteilung zyklischer Einwirkungen in harmonische, periodische, transiente und impulsartige Lasten möglich. Typisch für Verkehrsbelastungen sind transiente Verläufe mit einer Nichtperiodizität und einer beliebigen Einwirkdauer.

Messergebnisse zeigen, dass die zusätzlichen zyklischen Vertikalspannungskomponenten infolge Straßenverkehrsbelastungen marginal sind (Herold, 2001), während der Eisenbahnverkehr in Abhängigkeit der Überfahrtgeschwindigkeit und des Oberbausystems zu erheblichen vertikalen Zusatzspannungen führt. Diese klingen nach Gotschol (2002) bis in eine Tiefenlage von fünf Metern unter dem Oberbau sehr schnell ab.

Zur Zeit liegen Vorschläge bzw. Verfahren zur Berücksichtigung zyklischer Einwirkungen mittels eines quasi-statischen Bemessungsansatzes für Beanspruchung durch Erdbeben und Verkehrsbelastung vor. Kempfert et al. (1997) schlagen für Eisenbahnverkehrsbeanspruchungen in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit und Oberbauform Lasterhöhungsfaktoren in einer Größenordnung von 2,0 vor. Die Auswirkungen zyklischer Einwirkungen auf den Verankerungsbereich sind bislang jedoch noch nicht explizit untersucht worden und haben in den vorgestellten quasi-statischen Modellen daher keine Berücksichtigung gefunden.

Zur Präzisierung vorliegender Ansätze ist daher eine umfassende Untersuchung des Verankerungsbereiches unter Einfluss zyklischer Beanspruchungen notwendig.

1.4 Aufgabenstellung und Zielsetzung der Arbeit

Folgende Zielsetzungen sind zu Beginn der Arbeit formuliert worden:

- Umfassende Darstellung des momentanen Kenntnisstandes bezüglich weg- und kraftgesteuerter Auszugsversuche,
- Zusammenstellung wirklichkeitsnaher Belastungen auf Geokunststoffe in bewehrten Stützkonstruktionen sowie Steilböschungen,
- Entwurf, Konstruktion und Inbetriebnahme eines Versuchsstandes zur Durchführung weg- und kraftgesteuerter Auszugsversuche auf der Basis der Ergebnisse der Literaturrecherche sowie des Entwurfes der DIN EN 13738 zur „Bestimmung des Widerstandes gegen Auszug aus dem Boden“,
- Durchführung von Versuchen zur Kalibrierung des Versuchsstandes sowie Verifikation mit aus der Literatur vorliegenden Ergebnissen,
- Entwicklung eines einheitlichen und einfach anwendbaren Versuchsschemas für kraftgesteuerte Versuche unter zyklischen Einwirkungen,
- Erarbeitung wesentlicher statischer und zyklischer Einflussparameter auf das Auszieh- und Interaktionsverhalten,
- Ermittlung der Lastabtragungsmechanismen von Geogittern bei weg- und kraftgesteuerten Auszugsversuchen,
- Vergleich des Material- und Verschiebungsverhaltens weg- und kraftgesteuerter Auszugsversuche im Verbund,
- Ermittlung und Zusammenstellung von Kenngrößen des Interaktionsverhaltens bei weg- und kraftgesteuerten Versuchen zur Erstellung einer Datenbasis für Interfaces,
- Extrahierung relevanter Parameter für eine vereinfachte Bemessung des Auszugsverhaltens unter nicht-ständigen Lastkomponenten,
- Vorschlag eines Bemessungsverfahrens zur Umsetzung der Erkenntnisse in die Bemessungspraxis.

1.5 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in fünf Kernbereiche.

Zunächst wird in einer umfassenden Literaturlauswertung der bisherige Kenntnisstand aus dem Bereich weg- und kraftgesteuerter Auszugsversuche zusammengefasst. Dabei stehen im Kapitel 2 insbesondere die bisher untersuchten Einflussparameter und ihre Auswirkungen auf die Versuchsergebnisse im Vordergrund, da diese als Grundlage für den Entwurf und die Konstruktion des großmaßstäblichen Versuchsgerätes dienen. Weiterhin werden theoretische Grundlagen aus dem Bereich der Lastabtragungsmechanismen sowie unterschiedliche Beanspruchungsvarianten vorgestellt.

Der vorbereitende Teil beginnt mit der Vorstellung des verwendeten Versuchsstandes sowie dessen Einsatzmöglichkeiten im Kapitel 3. Die verwendeten Materialien, die durchgeführten Voruntersuchungen sowie das Versuchsprogramm werden ebenfalls umfassend in Kapitel 3 beschrieben.

Der experimentelle Teil beschäftigt sich im Wesentlichen mit der Auswertung der durchgeführten Versuchsreihen. Dabei werden die statischen Index- und Modellversuche mit ihren Einflussparametern und einer Analyse des Lastabtragungsverhaltens im Kapitel 4 vorgestellt. Sie dienen als Grundlage der zyklischen Modellversuche, die im Kapitel 5 der Arbeit beschrieben werden. Das Hauptaugenmerk wird hierbei ebenfalls auf die Einflussparameter gelegt, wobei die zyklischen Kennwerte Lastniveau, Amplitude, Frequenz und Lastspielzahl besonders detailliert beleuchtet werden. Die Analyse des Lastabtragungsverhaltens im zyklischen Modellversuch und der Vergleich mit den statischen Versuchsreihen komplettiert das Kapitel 5.

Im Analyseteil steht die Entwicklung einer Auswertemethodik der zyklischen Modellversuche im Kapitel 6 sowie der Vorschlag eines Bemessungsansatzes im Kapitel 7 im Vordergrund. Dazu wird zunächst ein allgemeingültiges Verfahren zur Beschreibung der Verschiebungen in Abhängigkeit wesentlicher Kernparameter entwickelt sowie ein Kriterium zur Beschreibung eines Versagenszustandes definiert. Ein spezielles Verfahren ermöglicht dabei eine signifikante Reduzierung der Versuchsdauer durch Datenextrapolation. Für die Ermittlung notwendiger Verankerungslängen unter zyklischer Beanspruchung wird ein Nomogramm- und ein analytisches Verfahren vorgestellt und die Anwendung anhand eines Bemessungsbeispiels verdeutlicht.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse sowie eine Diskussion und ein Ausblick schließen sich im letzten Abschnitt an.

2 Bisheriger Kenntnisstand

2.1 Einleitung

Im Folgenden ist der Kenntnisstand zur Thematik geokunststoffbewehrter Konstruktionen mit einem besonderen Fokus auf der Zyklik und Grundlagen des Tragverhaltens zusammengefasst. Hinsichtlich der eigenen Problemstellung wurde der Schwerpunkt der Literaturlauswertung auf eine umfassende Zusammenstellung zum Verbund- und Verankerungsverhalten von Geokunststoffen im Bodenmaterial unter statischer und zyklischer Belastung gelegt.

Der Aufbau einer entsprechenden Informationsbasis dient der zielführenden Entwicklung eines geeigneten Versuchsstandes, der Kalibrierung und dem Vergleich von Versuchsergebnissen mit Literaturerkenntnissen sowie der Entwicklung und Optimierung eines umfassenden Versuchsprogramms durch Konzentration auf relevante Einflussparameter.

2.2 Übersicht über geokunststoffbewehrte Konstruktionen

2.2.1 Bewehrungsfunktion von Geokunststoffen

Unter den Einsatzfunktionen von Geokunststoffen nimmt die Bewehrungsfunktion eine zentrale Rolle ein, da sie besonders hohe Anforderungen an das Material und die Verbundeigenschaften stellt. Koerner (1999) definiert eine Bewehrung mit Geokunststoffen als „synergetische Verbesserung der Festigkeitseigenschaften eines Gesamtsystems durch die Einbringung eines Geokunststoffes (welcher gute Zugeigenschaften besitzt) in den Boden (der gute Druckeigenschaften, aber schlechte Zugeigenschaften besitzt) oder andere unzusammenhängende bzw. getrennte Materialien“.

Als Hauptaufgabe wird daher nach Rüegger und Hufenus (2003) für das Bewehren die Übernahme von Zugkräften durch den Geokunststoff und die Übertragung in den Kontaktboden über Reibung definiert. Je nach Anwendungsfall sind Nebenaufgaben nützlich, sinnvoll oder unerlässlich. Es handelt sich hier vor allem um die Bereiche „Trennen“ und „Drainieren“.

Die Grundanforderungen an für Bewehrungszwecke verwendete Geokunststoffmaterialien werden nach Rüegger und Hufenus (2003) wie folgt definiert:

- Mechanisch: Aufnahme und Übertragung von Zugkräften unter begrenzter Deformation über die geforderte Gebrauchsdauer des Bauwerkes sowie ausreichende Widerstandskraft gegen Beschädigungen durch den Einbau
- Hydraulisch: Ausreichende Durchlässigkeit zur Verhinderung eines Wasserstaus über oder unter dem Geokunststoff mit gefährlichem Scherfestigkeitsverlust durch Reduktion der auf den Geokunststoff wirkenden Normalkraft infolge des Aufbaus eines Porenwasserdruckes

- Langzeitverhalten: Die oben genannten Anforderungen müssen über die geforderte Gebrauchsdauer des bewehrten Bauwerkes/Bauteiles erhalten bleiben. Durch Kriechen des Zuggliedes darf es nicht zu einem vorzeitigen Bruch kommen, und es dürfen keine langfristigen, unzulässigen Deformationen eintreten.

Stahl und Kunststoffe unterscheiden sich vor allem durch ihre Dehnsteifigkeit und ihre rheologischen Eigenschaften: Während bei Stählen hohe Dehnsteifigkeiten vorherrschen, liegen diese im Kunststoffbereich rohstoffabhängig deutlich niedriger. Jewell (1996) postuliert die Verwendung von Materialien ähnlicher Spannungs-Dehnungs-Beziehungen und favorisiert damit den Einsatz dehnbarer Kunststoffe in Verbindung mit Bodenmaterial. Diese flexiblen Bewehrungselemente erweisen sich als prädestiniert für den Einsatz in verformungsintensiven Verbundkörpern. Des Weiteren entfällt im Vergleich zum Stahl die Korrosionsproblematik, und die Produkte lassen sich einfacher herstellen und flexibler verarbeiten.

Kunststoffbewehrungen werden vordringlich als flächenhafte Bewehrungselemente in Gestalt von Geogittern, Geotextilien oder Verbundstoffen eingesetzt. Geogitter werden entsprechend ihres Herstellungsverfahrens als gelegt, gestreckt oder gewebt bezeichnet. Geotextilien lassen sich in die Untergruppen Geogewebe und Vliese unterteilen, wobei die Vliese wiederum entsprechend ihrer Herstellung in thermisch, mechanisch und chemisch verfestigte Produkte unterschieden werden (FGSV, 1994). Verbundprodukte sind im Allgemeinen Kombinationen der Regelprodukte zur gleichzeitigen Abdeckung mehrerer Funktionen. So kann durch einen Verbund eines Geogitters mit einem Vlies die Bewehrungs- und die Trennfunktion gleichzeitig gewährleistet werden.

2.2.2 Anwendungsgebiete geokunststoffbewehrter Konstruktionen

Geokunststoffbewehrte Konstruktionen liefern Lösungsmöglichkeiten für eine Vielzahl geotechnischer Problemstellungen. Exemplarisch werden in Bild 2.1 bewehrte Stützkonstruktionen, Gründungspolster, Widerlager, Geokunststoffe über pfahlartigen Tragelementen, Tragschichtbewehrungen oder Dämme auf weichem Untergrund mit Geokunststoffbewehrung dargestellt.

Bei den dargestellten Bauweisen handelt es sich entweder um Alternativen zu klassischen Bauweisen (z.B. Bewehrte Stützkonstruktion als Alternative zu einer Schwergewichtswand oder Winkelstützmauer) oder um neugeschaffene, innovative Bauformen wie z.B. Geokunststoffbewehrung auf pfahlartigen Tragelementen.

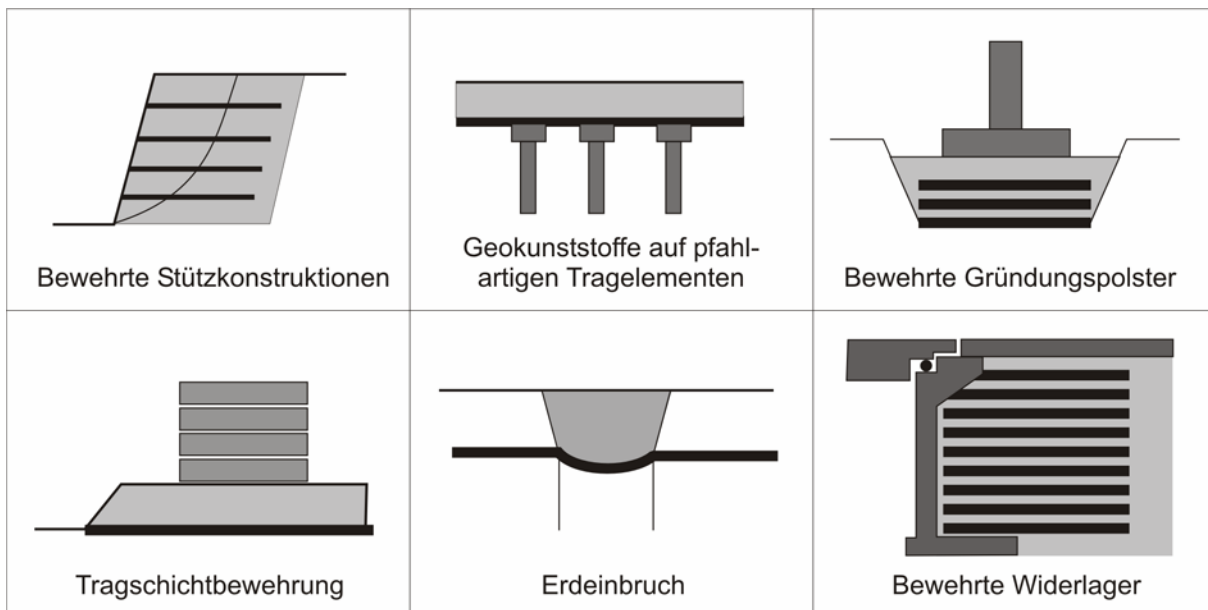


Bild 2.1: Anwendungsgebiete bewehrter Konstruktionen

Bei den vorgestellten Konstruktionen handelt es sich um Verbundkörper aus Boden und Kunststoff, bei denen beide Baustoffe in ihrer Kombination wirken. Dieses Verbundmodell ist mit dem Stahlbeton vergleichbar, wobei in der geotechnischen Anwendung die Geokunststofflagen die bewehrende Wirkung der Stahleinlagen im Stahlbeton übernehmen.

In Bild 2.2 sind die Mohr'schen Spannungskreise für einen unbewehrten und für einen bewehrten Körper dargestellt. Eine Erhöhung der Hauptspannung σ_1 bewirkt im bewehrten Fall keine Erhöhung der Hauptspannung σ_3 , da zusätzliche Kräfte in horizontaler Richtung durch die Bewehrungselemente aufgenommen werden. Anders ausgedrückt lassen sich durch die Einlage von Bewehrungselementen höhere Normalspannungen bei gleichbleibenden Schubspannungen aufbringen. Die Bewehrung bewirkt damit eine Kohäsion bzw. eine Erhöhung der Kohäsion und meist auch eine geringe Erhöhung des Reibungswinkels (Rüegger und Hufenus, 2003).

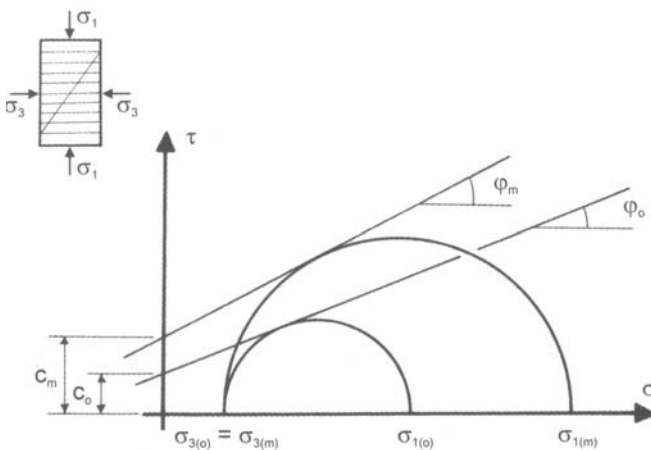


Bild 2.2:

Auswirkungen von Bewehrungslagen auf die aufnehmbaren Systemspannungen im Triaxialversuch, aus Rüegger und Hufenus (2003)

Der grundlegende Aufbau geokunststoffbewehrter Konstruktionen soll am Beispiel einer bewehrten Stützkonstruktion und einer Erdeinbruchüberbrückung mit Geokunststoffen aufgezeigt werden.

Die bewehrte Stützkonstruktion besteht mindestens aus dem Füllboden, der Hinterfüllung, dem Untergrund, den Bewehrungslagen und eventuell einer Konstruktionsoberfläche (Facing). Als Füllboden sollte qualifiziertes Material verwendet werden, das Facing kann in Form von umgeschlagenen Geokunststoffen, Scheingabionen oder Vorsatzelementen (z.B. aus Beton) gestaltet werden. Der Vorteil dieser Bauweise gegenüber klassischen Formen wie der Schwergewichtswand bzw. der Winkelstützmauer liegt häufig in einer Reduzierung der Bauzeit und einer Kosteneinsparung durch die Möglichkeit der Verwendung lokaler Baustoffe. Die Wirkungsweise entsprechender Konstruktionen wird in Abschnitt 2.2.3 detaillierter aufgezeigt.

Beim Neubau oder der Sanierung von Verkehrswegen müssen teilweise Bereiche gequert werden, in denen mit Erdfällen (geologisch begründete Erdeinbrüche) oder mit Tagesbrüchen (altbergbaulich bedingte Erdeinbrüche) an der Geländeoberfläche gerechnet werden muss (Bild 2.1). Entsprechend gefährdete Gebiete können im Vorfeld mit einer ein- oder mehrlagigen Erdeinbruchüberbrückung mit Geokunststoffen in Tiefenlagen von wenigen Metern gesichert werden. Beim Auftreten eines Schadensereignisses mit Durchmessern bis zu einigen Metern tragen die Geokunststofflagen über die Membranwirkung die Lasten des aufliegenden Bodens und eventuelle Verkehrslasten über dem Hohlraum ab und leiten sie in den umgebenden, standfesten Boden ein. Diese Einleitung erfolgt in der Art einer Verankerung (Meyer et al., 2003).

Als Alternative zu der Geokunststofflösung bieten sich in diesem Anwendungsbereich eine vorhergehende Sanierung entsprechender Hohlräume oder eine Überbrückung der gefährdeten Gebiete mit einer Stahlbetonplatte an.

2.2.3 Wirkungsweise bewehrter Stützkonstruktionen

Bewehrte Stützkonstruktionen umfassen einen großen Anteil der in Abschnitt 2.2.2 vorgestellten Konstruktionen. Aus diesem Grunde soll im Folgenden exemplarisch die Wirkungsweise dieser Bauweise vorgestellt werden.

Werden Böschungen mit geringen Böschungswinkeln β hergestellt, so reicht die Scherfestigkeit des Böschungsmaterials aus, um ein stabiles Gleichgewicht der antreibenden und rückhaltenden Kräfte zu erzeugen. Kommt es hingegen zu einer Vergrößerung des Böschungswinkels bis zu einem Maximalwert von 90° gegenüber der Horizontalen, kann das Krafteck aus antreibenden und rückhaltenden Kräften nicht geschlossen werden: Es bildet sich bei

Überschreitung der vorhandenen Scherfestigkeit ein instabiles System aus, bei dem es zu Rutschungen des aktiven Bereiches kommt (Bild 2.3).

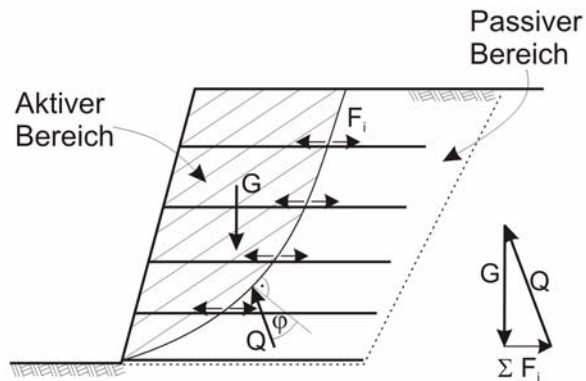


Bild 2.3:

Tragverhalten der Bewehrungslagen
am Beispiel einer Stützkonstruktion

Durch die Verbindung der sich längs der Gleitfläche gegenseitig verschiebenden Massen über eine Bewehrung können die gegenseitigen Bewegungen gestoppt werden, indem sich die Verbindungen unter der Verformung spannen. Dadurch werden in der Verbindung Zugkräfte F_i erzeugt, welche die Massen zusammenhalten (Bild 2.3 und Bild 2.4). Der Ansatz entsprechender Zugkräfte im Krafteck zeigt, dass durch Einlage von Geokunststoffen ein stabiler Gleichgewichtszustand erzeugt werden kann. Die Verbindung muss dafür beiderseits der Gleit- und Bruchfläche ausreichend verankert sein.

Da Geokunststoffe eine kaum nennenswerte Biege- oder Schubsteifigkeit aufweisen, erfolgt die Kraftübertragung praktisch nur über Zug, wobei im Bereich der Gleitfläche Umlenkungen stattfinden, welche in der Praxis der Bemessung und der Nachweise in der Regel vernachlässigt werden (Bild 2.4).

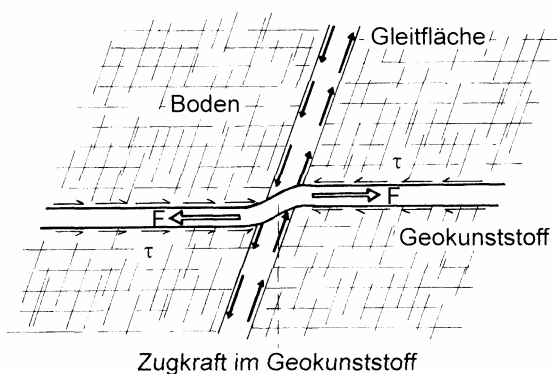


Bild 2.4:

Wirkung einer Geokunststofflage in einer
Gleitfläche eines Erdkörpers, aus
Rüegger und Hufenus (2003)

Ein Verfahren zur Bemessung stellt die Grenzgleichgewichtsmethode dar, die auf der Ermittlung des Kräfte- und Momentengleichgewichtes einer vorgegebenen Konstruktion zur Bestimmung ihrer vorhandenen Sicherheit beruht. Bruchkörper müssen dabei so gewählt werden, dass sie kinematisch möglich sind. Dies ist z.B. bei kreiszylindrischen Bruchflächen,

logarithmischen Spiralen oder mehrteiligen, keilförmigen Bruchkörpern der Fall. Dabei ist die ungünstigste Gleitlinie nachzuweisen.

Bei aufwändigeren Geometrien und Bodenschichtungen ist die Aufteilung in senkrechte Lamellen nach Krey oder Bishop notwendig. Das Gleichgewicht ist an jeder Lamelle nachzuweisen. Die Summe der antreibenden und haltenden Komponenten werden in einer Sicherheitsgleichung zusammengefasst.

Mögliche Rutschkörper werden untersucht, ob sie unter Berücksichtigung der vorhandenen Widerstände ein stabiles Gleichgewicht aufweisen. Dies ist der Fall, wenn die Summe der antreibenden Kräfte bzw. Momente, z.B. aus Bodeneigengewicht oder Auflasten, größer ist als die Summe der widerstehenden Kräfte und Momente. Auf der Widerstandsseite werden bei bewehrten Stützkonstruktionen neben der Scherfestigkeit auch die Zugkräfte F_i der verlegten Bewehrungslagen berücksichtigt. Tritt genau der Gleichgewichtszustand ein, so beträgt die Standsicherheit des untersuchten Bruchkörpers 1 und das System befindet sich im Übergang zu einem Versagenszustand (Grenzgleichgewicht).

2.2.4 Verankerung von Geokunststoffen

Zur Überprüfung der inneren Standsicherheit wird eine Bruchfuge zwischen der aktiven und der passiven Zone im Grenzzustand angenommen. Dabei wird der aktive Teil durch die Bewehrungslagen gehalten und im passiven Bereich verankert (vergleiche Abschnitt 2.2.3).

Für jede mögliche Bruchfläche sind folgende Nachweise zu führen:

- Nachweis gegen Bruch der Bewehrung,
- Nachweis gegen Herausziehen der Bewehrung,
- Nachweis der Anschlüsse.

Beim Nachweis gegen den Bruch der Bewehrung ist zu überprüfen, ob die ermittelten Kräfte in jeder Bewehrungslage kleiner oder gleich der Langzeitzugfestigkeit des Geokunststoffes sind. Die Langzeitzugfestigkeit berechnet sich aus der im Streifenzugversuch ermittelten Kurzzeitzugfestigkeit, welche um Faktoren für Kriechen, Einbaubeschädigung, Umweltbedingungen und Überlappungen/Stöße abgemindert wird.

Beim Nachweis gegen Herausziehen der Bewehrung wird überprüft, ob die Verankerungslänge ausreicht, um die berechnete Zugkraft im Geokunststoff in den Boden einzuleiten. Es handelt sich hierbei um eine Überprüfung der Grenzflächenscherfestigkeit zwischen Boden und Bewehrung. Bei Verwendung der Grenzgleichgewichtsmethode ist sicherzustellen, dass die Verankerungslänge ausreicht, um die angesetzte Zugkraft jeder Bewehrungslage jenseits der angesetzten Bruchfigur einleiten zu können. Werden die Bewehrungslagen bauartbedingt an ein Facing angeschlossen, so ist die ausreichende Kraftübertragungskapazität dieses Anschlusses nachzuweisen. Wird die Frontwand aus umgeschlagenen Bewehrungslagen gebildet, ist auch eine ausreichende Verankerungslänge jeder Bewehrungslage im aktiven Bereich nachzuweisen.

Beide Nachweise müssen erfüllt werden, wobei der kleinere der beiden ermittelten Werte maßgebend wird.

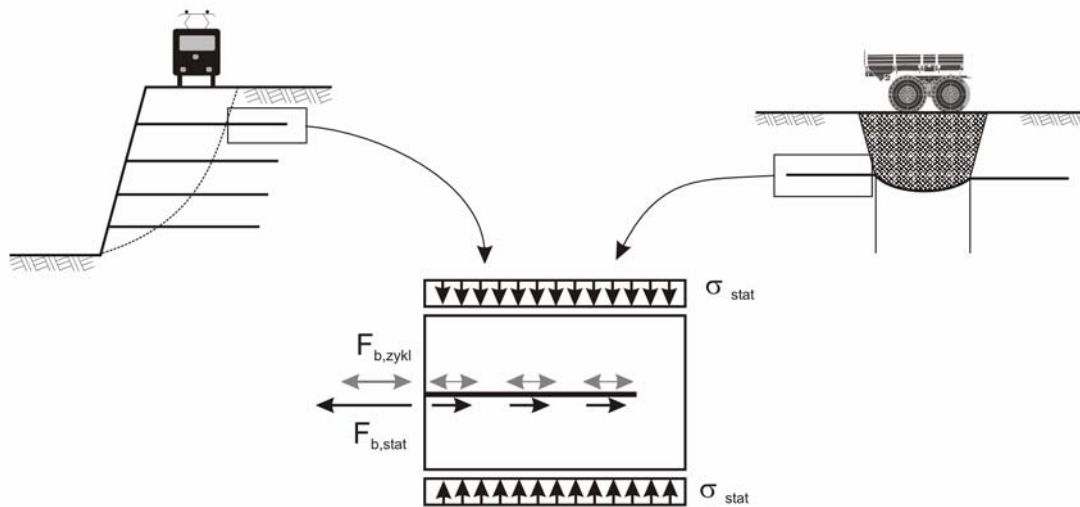


Bild 2.5: Verankerungsbereiche in einer bewehrten Stützkonstruktion und einer Erdrutschsicherung

Bild 2.5 verdeutlicht die maßgebenden Verankerungsbereiche einer bewehrten Stützkonstruktion und einer Erdrutschsicherung. Eine Untersuchung der Verankerungskapazität wird im Auszugsversuch durchgeführt.

2.3 Einwirkungen auf geokunststoffbewehrte Konstruktionen

2.3.1 Einwirkungsarten

Im Folgenden wird eine Übersicht über die typischen Einwirkungsarten geokunststoffbewehrter Konstruktionen gegeben. Einwirkungen erzeugen in maßgebenden Schnitten durch das Bauwerk sowie in den Berührungsflächen zwischen Bauwerk und Baugrund Beanspruchungen in Form von Schnittgrößen, Spannungen oder Verformungen (DIN 1054).

Die vertikalen statischen Einwirkungen setzen sich aus dem Bodeneigengewicht und vertikalen Spannungen aus dauerhaften Konstruktionen zusammen. Die statischen Belastungen der Geokunststoffe lassen sich in bewehrten Stützkonstruktionen näherungsweise über die Ermittlung des Erddrucks auf die Frontwand und dessen Aufteilung auf die angeschlossenen Bewehrungslagen ermitteln. Eine Umrechnung zwischen vertikalen Spannungen in der Bewehrungsebene und der Zugkraft in der Bewehrungslage kann auch über die Interaktionsparameter entsprechend des Abschnittes 2.4 erfolgen.

Dynamische Einwirkungen (beispielhaft in Bild 2.6 angedeutet) werden nach DIN 1054 unterteilt in:

- Dynamische Einwirkungen auf den Baugrund aus Regellasten auf Verkehrsflächen, aus Baubetrieb sowie infolge dynamischer Belastung von Bauwerken,
- Erhebliche dynamische Einwirkungen auf Bauteile infolge von Stößen durch Aufprall, Anprall, Druckwellen in Luft oder Wasser oder durch Schwingungen, z.B. durch Maschinen,
- Erdbebeneinwirkungen.

Einer Definition von Gotschol (2002) folgend, ist eine frequenzabhängige Einteilung der Einwirkungen möglich. Demnach werden Einwirkungen mit Frequenzen $f > 10$ Hertz als dynamisch und $f < 1$ Hertz als zyklisch bezeichnet. Vereinfachend werden daher im Folgenden „dynamische Einwirkungen“ im Sinne der DIN 1054 mit geringen Frequenzen als „zyklisch“ bezeichnet.

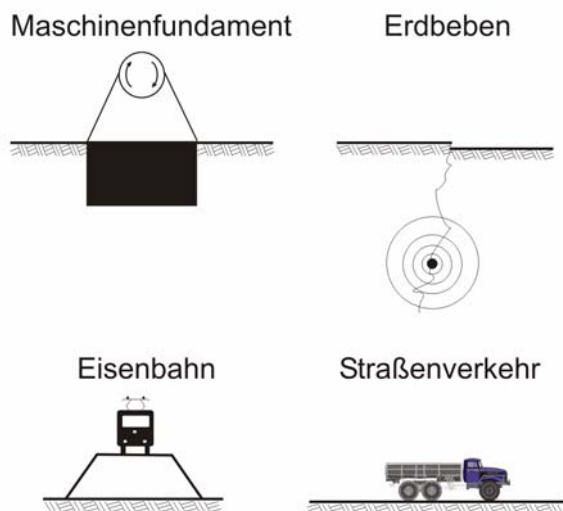


Bild 2.6:

Beispiele für dynamische Einwirkungen nach DIN 1054

Entsprechend ihrer zeitlichen Lastverläufe ist eine Unterteilung der Lasten in harmonische, periodische, transiente und impulsartige Lasten möglich. Typisch für Verkehrsbelastungen sind transiente Verläufe mit einer Nichtperiodizität und einer beliebigen Einwirkdauer.

Bei einer Unterteilung der Lasten nach der Art ihres Erregers kann in seismische Lasten, Verkehrsbelastungen, bauzeitliche Belastungen und sonstige Belastungen bspw. aus Maschinen unterschieden werden (Empfehlung 6.11, 2004). Im weiteren Verlauf werden im Wesentlichen Verkehrsbelastungen betrachtet.

Im Bereich des *Straßenverkehrs* sind die zusätzlichen Druckspannungen infolge PKW-Überfahrten zu vernachlässigen. Bei LKW-Überfahrten mit maximal 60 km/h über ein instrumentiertes Brückenwiderlager in „Kunststoff-Bewehrte-Erde“-Konstruktion ist von vertikalen

zyklischen Zusatzspannungen im Bereich von max. $\pm 1,0 \text{ kN/m}^2$ berichtet worden (Herold, 2001).

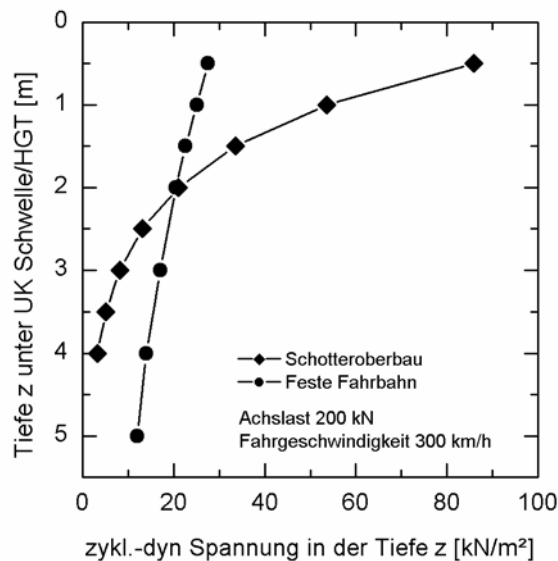


Bild 2.7:

Zyklisch-dynamische Vertikalspannung im Unterbau und Untergrund von Schienenverkehrswegen für die Oberbausysteme Schotter und Feste Fahrbahn bei einem Zugtyp ICE, nach Gotschol (2002)

[HGT = Hydraulisch gebundene Tragschicht]

Zusätzliche zyklische Druckspannungen infolge *Eisenbahnverkehr* sind von Gotschol (2002) zusammengestellt und ausgewertet worden. Dabei zeigt sich aufgrund der größeren Gesamtsteifigkeit und lastverteilenden Wirkung des Systems eine höhere Tiefenwirkung der Festen Fahrbahn bei geringeren vertikalen Zusatzspannungen im Vergleich zum Oberbausystem Schotter (Bild 2.7). Höhere Fahrgeschwindigkeiten führen dabei zu deutlichen Erhöhungen der Zusatzbelastungen. Die Auswertung von Messungen ergibt untergrundrelevante Anregungsfrequenzen in einem Frequenzbereich bis 10 Hz.

Über die Auswirkung zyklisch-dynamischer Vertikalspannungen auf die Belastung des Bewehrungsmaterials liegen bisher nur eingeschränkte Erkenntnisse vor. Gartung et al. (1996) konnten im Bereich einer Eisenbahnausbaustrecke an einer in etwa zwei Meter Tiefe liegenden, instrumentierten Geogitterlage die Geogitterdehnungen quer zur Fahrtrichtung bei einer Zugüberfahrt aufzeichnen. Dabei lassen sich Dehnungsanregungen einzelner Achsen und Drehgestelle identifizieren (Bild 2.8). Die Auswirkungen zyklischer Eisenbahnbelastungen auf die Bewehrungsmaterialien lassen sich damit qualitativ nachweisen. Erkenntnisse aus Bild 2.7 lassen auf deutlich höhere Dehnungsbeanspruchungen im oberen Dammbereich und bei höheren Fahrgeschwindigkeiten schließen.

In der Empfehlung 6.11 (2004) wird ein Verfahren zur Ermittlung von Zusatzlasten in den Bewehrungslagen auf Grundlage der zyklischen Vertikalspannungen unter Verwendung des Erddruckbeiwertes vorgestellt.

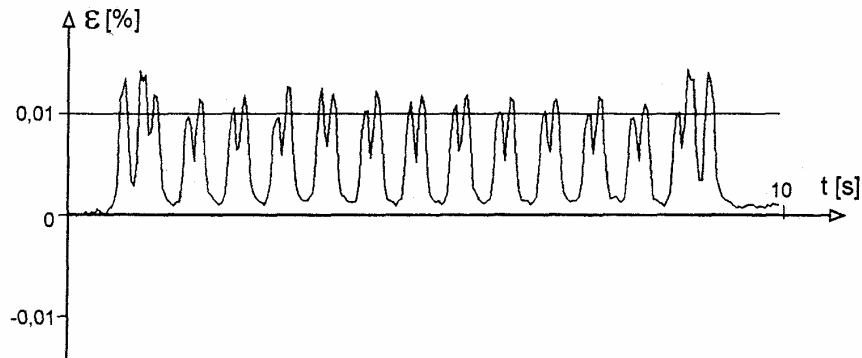


Bild 2.8: Zusatzdehnungen im Geogitter eines bewehrten Bahndammes bei der Überfahrt eines Zuges mit 160 km/h, aus Gartung et al. (1996)

2.3.2 Berücksichtigung zyklischer Einwirkungen bei der Bemessung

Vorschläge bzw. Verfahren zur Verwendung eines quasi-statischen Ansatzes zur Bemessung zyklisch-dynamisch beanspruchter Konstruktionen liegen für Erdbeben und Verkehrsbelastung vor.

Elias et al. (2001) stellen ein Verfahren vor, mit dem Erdbebenbeanspruchungen auf bewehrten Stützkonstruktionen berücksichtigt werden können. In Abhängigkeit von Erdbebenbeschleunigung und Geometrieparametern werden nach dem Mononobe-Okabe Ansatz zusätzliche horizontale Trägheits- und Schubkräfte ermittelt. Diese werden in abgeminderter Form bei dem Nachweis der äußeren Standsicherheit berücksichtigt. Im Bereich der inneren Standsicherheit werden sie anteilig der Länge jeder einzelnen Lage in der passiven Zone auf die Bewehrungslagen verteilt. Der Interaktionskoeffizient wird zur Berücksichtigung der Erdbebeneinwirkungen zusätzlich um den Faktor 0,8 abgemindert. Für den Erdbebenlastfall gelten dabei verminderte Sicherheiten.

Für Eisenbahnverkehrsbelastungen liegen Vorschläge für Lasterhöhungsfaktoren von Kempfert et al. (1997) in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit und Oberbauform vor. Vertikale Lasten sollen dabei mit Faktoren bis zu einer Größenordnung von 2,0 erhöht werden, wobei damit die gesamte Konstruktion auf kurzzeitig auftretende Lastspitzen bemessen wird. Es stellt sich dabei die Frage, ob es sich bei diesen Lastspitzen um die bemessungsrelevante Belastung handelt oder ob sich nicht vielmehr positive Wirkungen aufgrund von Verzahnungs- oder Verdichtungseffekten ergeben.

Bonaparte et al. (1986) haben in ihren Analysen von Erdbebenbeanspruchungen auf bewehrte Konstruktionen ermittelt, dass die zusätzliche Einlage weniger Bewehrungslagen für eine Bemessung des Erdbebenlastfalles ausreicht, da die visko-elastischen Eigenschaften

des Geokunststoffes eine höhere Festigkeit unter schnellen Lasteinwirkungen ermöglichen und in der seismischen Bemessung niedrigere Sicherheiten erfüllt werden müssen.

Allgemein wird festgestellt, dass eine zu geringe Informationsdichte über die Einflüsse zyklischer und dynamischer Belastungen auf das Verhalten bewehrter Stützkonstruktionen vorliegt.

2.4 Verbundverhalten von Boden und Bewehrung

2.4.1 Ermittlung der Grenzflächenscherfestigkeit

Zur Beschreibung des Verbundverhaltens von Boden und Bewehrung ist im Wesentlichen die Kenntnis der Grenzflächenscherfestigkeit zwischen beiden Werkstoffen von Bedeutung. Nach Batereau (1982) ist „allgemein unter ‚Grenzflächenscherfestigkeit‘ das Erreichen eines Grenzspannungszustandes bei Schub in einer Grenzschicht zwischen zwei unterschiedlichen Materialien bzw. Lockergesteinszonen zu verstehen“.

Die Grenzflächenscherfestigkeit ermittelt sich aus der Grenzbedingung nach Coulomb zu:

$$\tau_{sg}(\sigma) = c_{sg} + \sigma \cdot \tan \varphi_{sg} \quad (2.1)$$

mit: $\tau_{sg}(\sigma) =$ Grenzflächenscherfestigkeit bei der Normalspannung σ
 $c_{sg} =$ Strukturfestigkeit bei einer Normalspannung von Null
 $\sigma =$ Normalspannung in der Grenzschicht
 $\tan \varphi_{sg} =$ Reibungswinkel zwischen Geokunststoff und Erdstoff

Die Scherfestigkeit bei der alleinigen Untersuchung des Erdstoffes ermittelt sich zu:

$$\tau_s(\sigma) = c_s + \sigma \cdot \tan \varphi_s \quad (2.2)$$

mit: $\tau_s(\sigma) =$ Scherfestigkeit bei der Normalspannung σ
 $c_s =$ Kohäsion bei einer Normalspannung von Null
 $\tan \varphi_s =$ Reibungswinkel des Erdstoffes

Bei den angegebenen Gleichungen handelt es sich um die Darstellung der Schergeraden und Reibungs- bzw. Auszugsgeraden im σ - τ -Diagramm. Die Form einer linearen Grenzbedingung trifft in guter Näherung für locker gelagerte nicht-bindige Erdstoffe sowie für normal-konsolidierte bindige Erdstoffe zu (Stoewahse, 2001).

Eine Aussage über die Verbundwirkung von Geokunststoff und Erdstoff kann über die Bildung des auflastabhängigen Reibungsverhältnisses $f_g(\sigma)$ getroffen werden:

$$f_g(\sigma) = \frac{\tau_{sg}(\sigma)}{\tau_s(\sigma)} \quad (2.3)$$

Ein größeres Reibungsverhältnis ist dabei ein Indikator für einen besseren Verbund.

Die Scherfläche in der Grenzschicht kann sich dabei theoretisch wie folgt ausbilden:

$f_g(\sigma) < 1 \rightarrow$ Scherfläche direkt in der Kontaktfläche zwischen Geokunststoff und Erdstoff

$f_g(\sigma) > 1 \rightarrow$ Scherfläche im Erdstoff

$f_g(\sigma) = 1 \rightarrow$ Indifferente Lage der Scherfläche

Für den Verbund mit einem kohäsionslosen Erdstoff kann die Coulomb'sche Grenzbedingung unter Einbeziehung des Reibungsverhältnisses entsprechend Gleichung (2.4) formuliert werden, wenn das Reibungsverhältnis mit Einbeziehung des Strukturwiderstandes ermittelt wird.

$$\tau_{sg}(\sigma) = c_{sg} + \sigma \cdot f_g \cdot \tan \varphi_s = c_{sg} + \sigma \cdot f_{sg} \quad (2.4)$$

mit: $f_g = \frac{\tan \varphi_{sg}}{\tan \varphi_s} =$ auflastunabhängiges, konstantes Reibungsverhältnis

$f_{sg} = f_g \cdot \tan \varphi_s =$ auflastunabhängiger Grenzflächenreibungsbeiwert bzw. Interaktionskoeffizient

Bei gleichzeitiger Vernachlässigung der Strukturfestigkeit vereinfacht sich der Term zu

$$\tau_{sg}(\sigma) = \sigma \cdot f_g \cdot \tan \varphi_s = \sigma \cdot f_{sg} \quad (2.5)$$

In einer bewehrten Stützkonstruktion treten im Wesentlichen zwei unterschiedliche Verbundmechanismen zwischen Erdstoff und Geokunststoff auf (Jewell, 1996):

1. Einseitiges Abscheren auf einer Scherfuge (Bild 2.3: unterste Lage).
2. Verankerung mit Herausziehen mit einer Aktivierung von zwei Scherfugen im Versagensfall (Bild 2.5).

Für die Untersuchung des Grenzflächenverhaltens stehen unterschiedliche Laborversuche zur Verfügung: Direkter Scherversuch, Auszugsversuch, Triaxialversuch, Biaxialversuch, Rütteltischversuch und Schiefe-Ebene-Versuch. In Anlehnung an die aufgezeigten Verbundmechanismen im Erdkörper erfolgt die Bestimmung der Grenzflächenscherfestigkeit im Labor im Wesentlichen mit dem direkten Scherversuch und dem Auszugsversuch. Simuliert wird dabei zum einen das Abgleiten eines Bodenkörpers auf einer, durch die Oberfläche des Geokunststoffes vorgeschriebenen Bahn (Direkter Scherversuch) und im anderen Fall das Versagen infolge Herausziehen des Geokunststoffes aus dem Boden (Auszugsversuch).

Aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen und Beanspruchungsarten ergeben beide Testmethoden gerade bei flexiblen Geogitterprodukten unterschiedliche Grenzflächenreibungsbeiwerte (Juran et al., 1988) (Alfaro et al., 1995), so dass beide Tests für den jeweiligen Anwendungsbereich durchgeführt werden sollten. Juran et al. (1988) empfehlen den Auszugsversuch für Bewehrungsanwendungen, da er die wirklichen Gegebenheiten in der bewehrten Stützkonstruktion am besten abbildet und wesentliche Parameter wie das Dilatanzverhalten des Erdstoffes und die Dehnbarkeit der Bewehrung realitätsnäher simulieren kann.

2.4.2 Direkter Scherversuch

Die Bestimmung der Grenzflächenscherfestigkeit im direkten Scherversuch wird in Deutschland in der DIN EN ISO 12957-1, Geotextilien und geotextilverwandte Produkte, Bestimmung der Reibungseigenschaften, Teil 1: Scherkastenversuch, geregelt. Es wird ein Scherkasten mit den Mindestabmessungen von 300 mm x 300 mm vorgeschrieben, wobei die Messproben mit einer Klemmvorrichtung mit dem unteren Scherkasten verbunden werden. Bei Geogittern müssen während des gesamten Versuches mindestens drei Längsrippen im Kastenbereich enthalten sein.

Die Grenzflächenscherfestigkeit ermittelt sich zu:

$$\tau = \frac{S^*}{A^*} \quad (2.6)$$

mit: S^* = Scherkraft

A^* = Kontaktfläche der Proben

Geschlossene Probenmaterialien können entweder mit einem festen Block oder mit einer Erdstofffüllung im unteren Scherkasten untersucht werden. Das Verbundverhalten von Geogittern wird durch Reibung an der Materialoberfläche und durch Bodenkontakt durch die Gitteröffnungen hindurch beeinflusst, so dass beide Scherkastenhälften mit Erdstoff gefüllt sein sollten (Jewell, 1996).

Wesentliche Einflussfaktoren bei der Ermittlung der Grenzflächenscherfestigkeit im direkten Scherversuch sind die Dichte und Kornstruktur des eingebauten Erdstoffes, die Art und Größe der Belastung sowie Einflüsse aus der Gerätekonfiguration und Einbautechnik. In Ringversuchen hat Stoewahse (2001) deutliche Streuungen der Grenzflächenscherfestigkeit aufgrund unterschiedlicher verwendeter Gerätetypen festgestellt. Als Standardgerät empfiehlt er eine Gerätekonfiguration mit vertikal verschieblichem oberen Rahmen.

Martin et al. (1984) haben bei direkten Scherversuchen an unterschiedlichen Geokunststoff-Geokunststoff und Geokunststoff-Sand Interfaces für einen mitteldichten Sand Verbundreibungswinkel von 65 bis 90 % des Reibungswinkels ermittelt, während Eigenbrod und Locker (1987) bei lockeren und dichten Sanden in Verbindung mit unterschiedlichen Geotextilien

Verbundreibungswinkel von 76 bis über 90 % des Reibungswinkels gemessen haben. Zusammenstellungen von Koerner (1999) mit unterschiedlichen Geogittern in einem dichten Sand zeigen Verbundreibungswinkel von 72 bis über 100 % des Reibungswinkels. Durch Lastabtragungsmechanismen vor den Querstreben der Geogitter kommt es zu einer Verlagerung der Scherfuge in den Erdstoff, so dass Verbundreibungswinkel größer 100 % des Reibungswinkels erreicht werden können (Koerner, 1999).

Zur Versuchsmethodik unter zyklischen Lasten werden in der deutschen Normung bisher keine Angaben gemacht. Herold (Herold und Mannsbart, 1997; Herold, 1999) kommt in Untersuchungen von Vliesstoffen und Sand im Kreisringschergerät unter dynamischer vertikaler Belastung zu dem Ergebnis, dass sich der Bruchreibungswinkel nur unwesentlich mit der Frequenz ändert, aber ein zunehmender dynamischer Lastanteil zu einer eindeutigen Abnahme der Grenzflächenscherfestigkeit führt.

2.4.3 Auszugsversuch

Zur Bestimmung der Grenzflächenscherfestigkeit im Auszugsversuch ist in Deutschland die DIN EN 13738, Geotextilien und geotextilverwandte Produkte, Bestimmung des Widerstandes gegen Auszug aus dem Boden, anzuwenden. Darin wird ein Prüfverfahren festgelegt, mit dessen Hilfe im Laboratorium unter Verwendung eines Auszugskastens der Widerstand bestimmt werden kann, den Geotextilien und geotextilverwandte Produkte gegen Herausziehen (Auszug) aus dem Boden besitzen. Es ist dabei ein Auszugskasten zu verwenden, der mindestens 1,50 m lang, 0,60 m breit und 0,30 m hoch ist. Die Vertikalspannung sollte gleichmäßig mit einer flexiblen Membran aufgebracht werden. Das Herausziehen der Geokunststoffprobe aus dem Auszugskasten erfolgt weggesteuert in horizontaler Richtung.

In der amerikanischen Normung (ASTM D 6706-01) werden geringere Mindestabmessungen vorgeschrieben. Ein Herausziehen wird dabei als Bewegung des Geokunststoffes über seine gesamte Einbindelänge definiert, wobei zwischen einem Anfangsherausziehen, bei dem sich das Probenende bewegt, und einem Gesamtherausziehen, bei dem die Bewegungen an allen Punkten der Messprobe gleich sind, unterschieden wird. Nach Federal Highway Administration (Elias et al., 2001) ist für dehnbare Bewehrungen von einem Herausziehen der Probe bei einer Verschiebung des hinteren Endes um 15 mm auszugehen.

Nach Koerner (1999) handelt es sich beim Auszugsversuch um den anspruchvollsten und komplexesten Versuch im Bereich der Geokunststoff-Versuchstechnik. Trotzdem ist bereits eine Vielzahl weggesteuerter, aber auch zyklischer Versuche mit unterschiedlichsten Geräten und Randbedingungen durchgeführt worden. Im Folgenden werden daher zunächst wesentliche Mechanismen im Auszugsversuch erläutert und anschließend vorhandene Erkenntnisse aus der Literatur in Hinblick auf die Entwicklung eines neuen Versuchsstandes ausgewertet.

Bei einer Auftragung der Auszugskraft über die Verschiebung zeigt sich in der Regel ein ausgeprägter Maximalwert, der als Höchstauszugskraft bzw. Peak bezeichnet wird.

2.4.3.1 Auszugswiderstand und Lastabtragung

Die Ermittlung der Grenzflächenscherfestigkeit erfolgt beim Auszugsversuch nach Gleichung (2.7).

$$\tau_{sg} = \frac{F}{2 \cdot b \cdot l} \quad (2.7)$$

mit: F = Auszugskraft
 b = Breite der Geokunststoffprobe
 l = Einbindelänge der Geokunststoffprobe

Es erfolgt eine Aufteilung der Kraft auf die obere und untere Grenzschicht der Messprobe (Bild 2.9), so dass von einer zweiseitigen Grenzschicht gesprochen werden kann. Bei nicht geschlossenen Strukturen wie Geogittern wird die Auszugskraft auf die Grundfläche der Messprobe umgerechnet, obwohl die wirkliche Materialoberfläche kleiner ist. Verschiedene Lastabtragungsmechanismen werden dabei zusammengefasst.

Werden die maximalen Auszugskräfte verschiedener Versuche bei unterschiedlichen Auflasten ausgewertet, so lässt sich im σ - τ -Diagramm eine Auszugsgerade mit dem Verbundreibungswinkel φ_{sg} und der Strukturfestigkeit c_{sg} konstruieren. Entsprechend der Angaben in Abschnitt 2.4.1 lassen sich das Reibungsverhältnis und der Grenzflächenreibungsbeiwert bestimmen, so dass sich die maximale Auszugskraft unter Vernachlässigung der Kohäsion wie folgt berechnen lässt:

$$F_p = 2 \cdot l \cdot b \cdot \tau_p = 2 \cdot l \cdot b \cdot (\sigma \cdot f_g \cdot \tan \varphi_s + c_{sg}) = 2 \cdot l \cdot b \cdot (\sigma \cdot f_{sg} + c_{sg}) \quad (2.8)$$

mit: F_p = Maximale Auszugskraft
 τ_p = Maximale Auszugsspannung

Die Auszugskräfte und damit das Reibungsverhältnis und der Grenzflächenreibungsbeiwert sind insbesondere von den Eigenschaften des Erdstoffes und von der Art des Geokunststoffes abhängig. In der Literatur werden drei wesentliche Verbundmechanismen unterschieden (Juran et al., 1988; Milligan und Palmeira, 1987; Voskamp, 1992):

- Reibung zwischen dem Boden und der Bewehrung
- Einlagerung von Bodenmaterial in die Gitteröffnung (Interlock)
- Passiver Erdwiderstand vor den Querstreben

Die Auszugswiderstände von geschlossenen Strukturen wie Geomembranen werden ausschließlich durch Reibungskräfte mobilisiert, während bei Geotextilien je nach Art und Aufbau durch Einlagerung kleinerer Korngrößenfraktionen in die Struktur zusätzlicher Widerstand erzeugt werden kann.

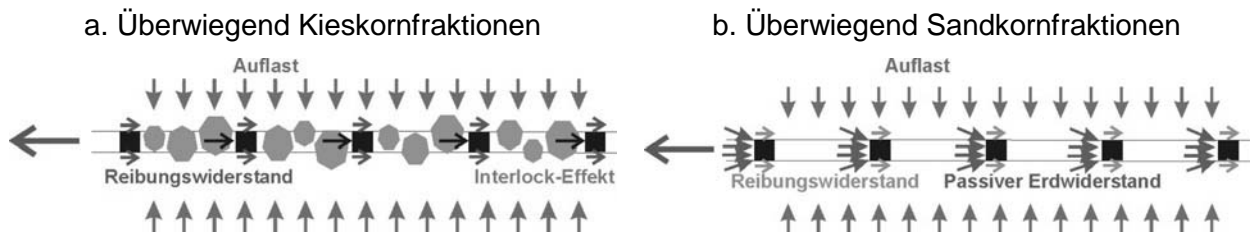


Bild 2.9: Maßgebliche Lastabtragungsmechanismen bei nicht-bindigen Erdstoffen

Bei Geogittern kommt es zusätzlich zu Widerständen aus passivem Erdwiderstand sowie Interlock, wobei der passive Erdwiderstand bei kleineren Kornfraktionen (Bild 2.9 b.), der Interlock bei größeren Kornfraktionen überwiegt (Bild 2.9 a.). Die Reibungsanteile sind bei Geogittern gegenüber geschlossenen Bewehrungen aufgrund der kleineren Materialoberfläche gering (Koerner, 1999; Milligan und Palmeira, 1987).

2.4.3.2 Auswertung statischer Versuche

2.4.3.2.1 Einführung

In den letzten Jahrzehnten ist eine große Anzahl statischer Auszugsversuche mit unterschiedlichen Materialien, Randbedingungen und Zielstellungen durchgeführt worden, so dass ein direkter Vergleich der Versuchsergebnisse nicht immer gegeben ist. Im Folgenden sind wesentliche Einflussfaktoren extrahiert und hinsichtlich ihrer Relevanz ausgewertet worden (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Einflussfaktoren statischer Auszugsversuche

Versuchsbedingte Faktoren	Bodenbedingte Faktoren	Bewehrungsbedingte Faktoren
<ul style="list-style-type: none"> - Auflast - Auszugsgeschwindigkeit - Nasenlänge - Reibungsverluste an den Seitenwänden/Frontwand 	<ul style="list-style-type: none"> - Bodenart - Kornzusammensetzung - Einbaudichte - Schichtdicke oberhalb der Bewehrung 	<ul style="list-style-type: none"> - Bewehrungsart - Bewehrungsgeometrie - Bewehrungsbreite - Bewehrungslänge

Diese Auswertung ermöglicht es, Randbedingungen des Versuchsgerätes optimal zu wählen und Vergleichs- bzw. Verifikationsdaten für eigene Untersuchungen zur Verfügung zu stellen. Detaillierte Angaben zu den in den ausgewerteten Literaturquellen verwendeten Geräten und Materialien sind dem Anhang B zu entnehmen.

2.4.3.2.2 Auflast und Dilatanz

Von den aufgeführten Faktoren hat die Auflast einen maßgebenden Einfluss auf die Ergebnisse der Auszugsversuche. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse verschiedener Autoren zeigt einen deutlichen Anstieg der Höchstauszugskraft mit zunehmender Auflast (Bild 2.10). Die Gründe hierfür liegen in einer durch die Normalspannungserhöhung verursachten Erhöhung der Reibung und der Widerstände vor den Querstreben sowie in einer Verdichtung des Bodens (Farrag et al., 1993; Lopes und Ladeira, 1996).

Aufgrund variierender Randbedingungen und Materialien kommt es bei den Absolutwerten zu erheblichen Abweichungen.

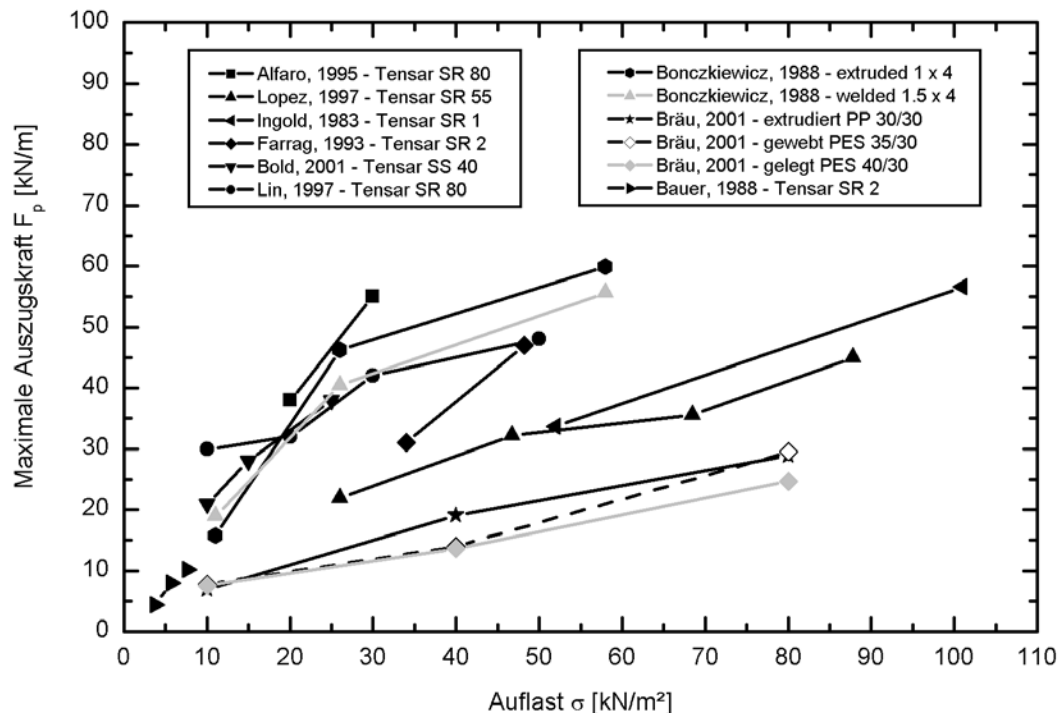


Bild 2.10: Entwicklung der maximalen Auszugskraft in Abhängigkeit der Auflast, Zusammenstellung verschiedener Autoren

Durch das Dilatanzverhalten des eingebauten Erdstoffes kann es zusätzlich zu einer Normalspannungserhöhung in der Ausziehfuge kommen. Dabei ist bei allen bekannten Pull-Out-Geräten die obere Hälfte des Versuchsstandes aus versuchstechnischen Gründen unverschieblich gelagert, so dass vertikale Bodenbewegungen infolge Dilatanzerscheinungen durch die Konstruktion behindert werden. Diese Behinderung führt zu einer Normalspannungserhöhung in der Grenzfläche zwischen dem Erdstoff und der Bewehrung (Alfaro et al., 1995; Farrag et al., 1993). Juran et al. (1988) zeigt, dass die eingeschränkte Dilatanz mit steigender Auflast zunimmt. Dies resultiert in einer höheren Verbundfestigkeit und damit in einem Anstieg der Auszugskraft.

Alfaro et al. (1995) haben eine Abnahme der Vertikalverschiebungen des Erdstoffes an der Oberkante eines Pull-Out-Gerätes mit steigender Auflast festgestellt und daraus ebenfalls gefolgert, dass diese Abnahme durch eine Einschränkung der Dilatanz und damit einer Erhöhung der Normalspannungen verursacht wird.

Zanzinger (2001) misst an seinem kleinmaßstäblichen Pull-Out-Gerät die Normalspannung direkt in der Grenzfläche zwischen Boden und Bewehrung. Er zeigt, dass die Normalspannung in dieser Grenzfläche bei einem Sand ab etwa 60 kN/m² Auflast ansteigt. Bei einer Auflast von 100 kN/m² wird eine Erhöhung der Normalspannung von mehr als 50 % mit stei-

gendem Auszugsweg gemessen, so dass von einer deutlichen Auflastabhängigkeit des Dilatanzverhaltens ausgegangen werden kann (Bild 2.11).

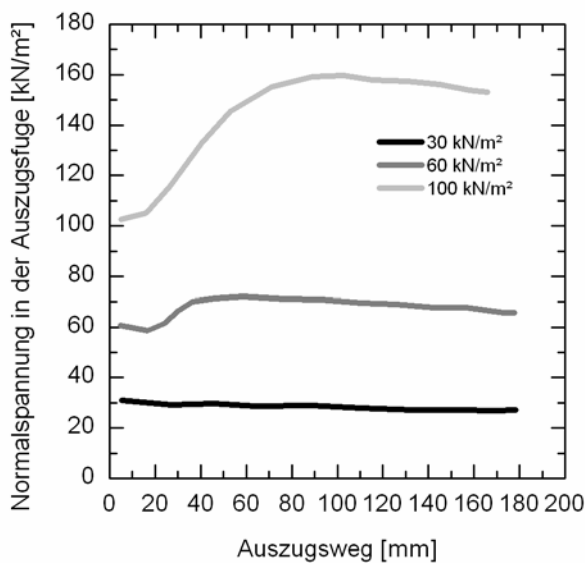


Bild 2.11:

Veränderung der Normalspannung in der Scherfuge in Abhängigkeit des Auszugsweges, nach Zanzinger (2001)

Die Lastabtragung und die Verformungen der Bewehrungsmaterialien sind ebenfalls stark auflastabhängig. Dem Bild 2.12 ist zu entnehmen, dass eine Kraftübertragung von der Probe in den umgebenden Erdstoff bei hohen Auflasten vor allem im vorderen Bereich erfolgt, während das Geogitter bei geringeren Auflasten gleichmäßiger aktiviert wird. Die bei hohen Auflasten im vorderen Bereich gemessenen Verschiebungen resultieren daher zu einem Großteil aus Dehnungen und nicht aus Verschiebungen der gesamten Probe (Farrag et al., 1993; Lopes et al., 1996).

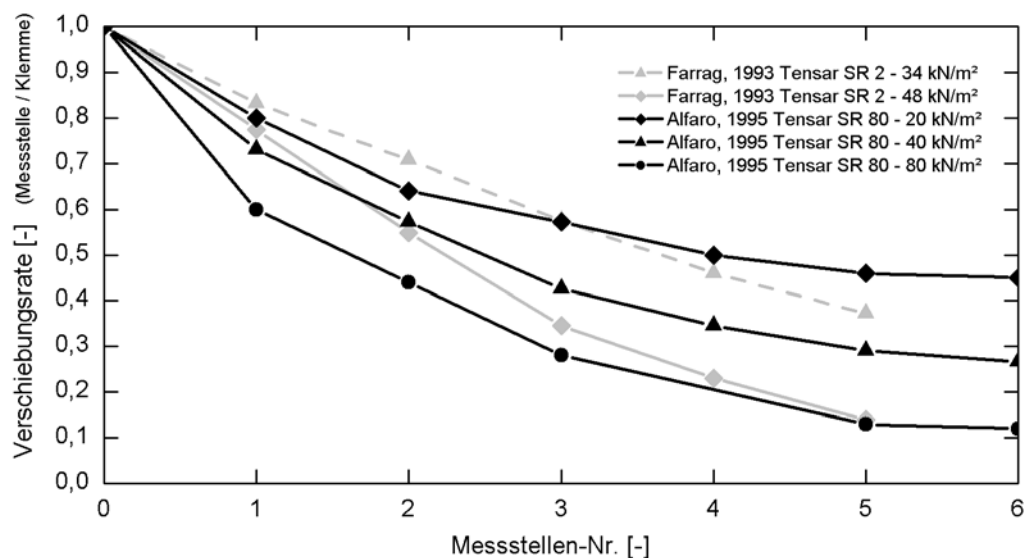


Bild 2.12: Auf die Klemme bezogene Verschiebung einzelner Wegaufnehmer in Abhängigkeit der Einbindelänge der Probe, Zusammenstellung verschiedener Autoren

2.4.3.2.3 Einbaudichte

Mit steigender Lagerungsdichte nehmen die Höchstauszugswiderstände von Geogittern deutlich zu (Bild 2.13). Durch die höhere Einbaudichte wird vor allem der durch das Herausziehen mobilisierte passive Erdwiderstand vor den Querstreben erhöht. Zusätzlich steigen Dilatanzeffekte mit der Lagerungsdichte an, so dass es zu dem in Abschnitt 2.5.3.2.2 beschriebenen Anstieg der Normalspannung in der Grenzfläche zwischen Erdstoff und Bewehrung kommt (Farrag et al., 1993). Für die Zunahme der Höchstauszugskraft mit steigender Dichte ist außerdem eine Erhöhung des Reibungseffektes verantwortlich, der durch steigende Reibungswinkel bei höheren Dichten erkennbar wird (Stoewahse, 2001).

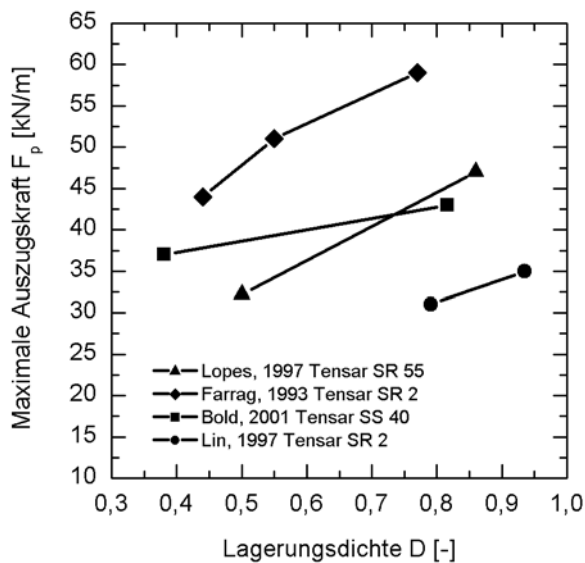
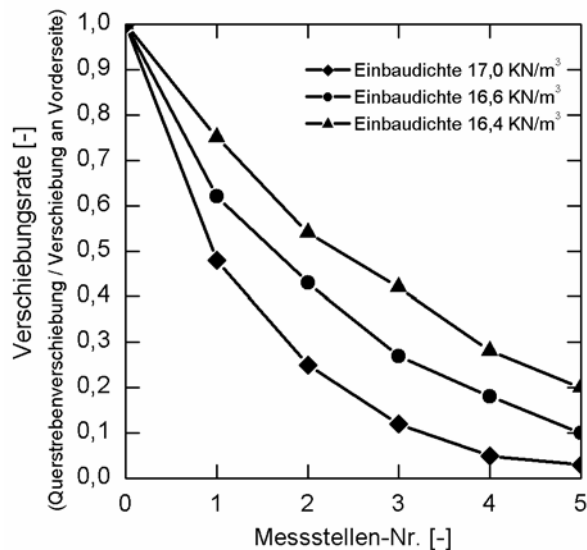


Bild 2.13:

Maximale Auszugskraft in Abhängigkeit der Lagerungsdichte, Zusammenstellung verschiedener Autoren

Die Lagerungsdichte wirkt sich auch auf den Lastabtrag des Bewehrungsmaterials in den umgebenden Erdstoff aus: Die zum Zeitpunkt der Höchstauszugskraft gemessenen Verschiebungen der Bewehrung in dicht gelagerten Böden sind deutlich kleiner als in locker gelagerten. Die Krafteinleitung erfolgt in dicht gelagerten Böden verstärkt im vorderen Bereich der Probe, während in locker gelagerten Böden die gesamte Bewehrung die Auszugskräfte abträgt (Lopes et al., 1996; Lin et al., 1997). Bild 2.14 zeigt exemplarisch für drei verschiedene Einbaudichten die Verschiebung einzelner Querstreben der Probe eines extrudierten Geogitters im Verhältnis zur Verschiebung an der Vorderseite. Deutlich ist bei geringerer Einbaudichte die verstärkte Aktivierung des hinteren Bereiches zu erkennen.

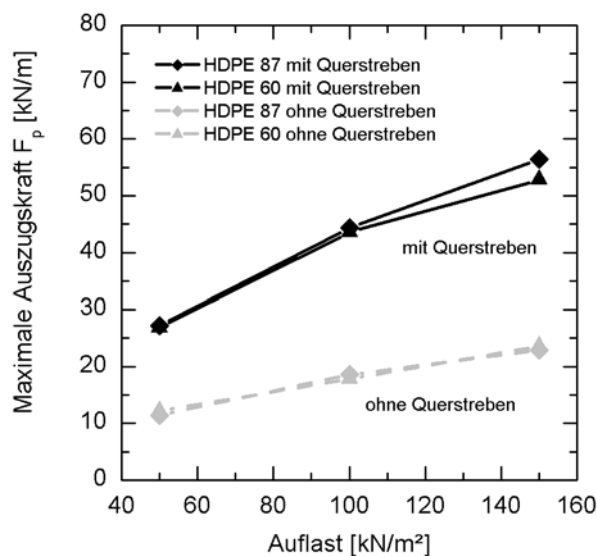
**Bild 2.14:**

Einfluss der Einbaudichte auf den Verlauf der Verschiebungen, nach Farrag et al. (1993)

2.4.3.2.4 Bodeneigenschaften und Bewehrungsart

Das Verbundverhalten zwischen Erdstoff und Bewehrung ist in hohem Maße von den Eigenschaften des gewählten Erdstoffes und von der Bewehrungsart abhängig.

Geschlossene Bewehrungen wie Geomembrane mobilisieren ausschließlich Reibungskräfte auf einer relativ glatten Oberfläche, während Geotextilien aufgrund ihrer strukturierten Oberfläche zusätzlichen Widerstand aus eingelagerten Bodenpartikeln aufbauen können. Geogitter mobilisieren aufgrund der verhältnismäßig kleinen Oberfläche nur geringe Reibungskräfte entlang der Längs- und Querstreben. Sie tragen einen Großteil der Kräfte über Mechanismen vor den Querstreben ab. Untersuchungen von Palmeira (1987), Ziegler und Timmers (2003) sowie Chang (1995) an Gittern mit und ohne Querstreben zeigen einen Lastabtragungsanteil der Querstreben von bis zu 80 % (Bild 2.15).

**Bild 2.15:**

Einfluss der Auflast auf die maximale Auszugskraft in Abhängigkeit des Querstrebenanteils, nach Chang et al. (1995)

Dabei hängt die Größe des sich aufbauenden passiven Erdwiderstandes und Interlocks vor den Querstreben sowohl von Gittereigenschaften (Dicke, Länge und Abstand der Querstreben) als auch von den Eigenschaften des Erdstoffes (Korngrößenverteilung, Kornform, Einbaudichte und Reibungswinkel) ab. Bei einer größeren Querstrebenfläche normal zur Zugrichtung wird dabei ein größerer Widerstand erzeugt, während sich der Erdstoff bei flachen Querstreben über die Strebe hinweg schiebt. Der Interlock-Effekt wird in hohem Maße von dem Verhältnis der Gitteröffnung zur Partikelgröße des eingebauten Erdstoffes bestimmt.

$$\text{SDR} = \frac{\text{Kleinere Öffnungsweite}}{\text{mittlerer Korndurchmesser}} \quad (2.9)$$

Bei Verhältnissen $\text{SDR} > 1$ nach Gleichung (2.9) können sich Partikel in die Gitteröffnungen einlagern. Der Verbund wird optimal, wenn der mittlere Korndurchmesser nur geringfügig kleiner als die Gitteröffnungen ist ($\text{SDR} \rightarrow 1$), da sich einzelne Bodenpartikel in den Gitteröffnungen verkeilen. Ist die mittlere Korngröße erheblich kleiner als die Gitteröffnungen ($\text{SDR} \gg 1$), kommt es zu Erdwiderstandsbildungen, aber nur in geringem Maße zu Verzahnungen von Partikeln. Übersteigt die durchschnittliche Partikelgröße die Größe der Gitteröffnungen ($\text{SDR} < 1$), rutschen sie beim Herausziehen des Bewehrungsmaterials über die Gitteröffnungen hinweg (Koerner, 1999; Juran et al., 1988).

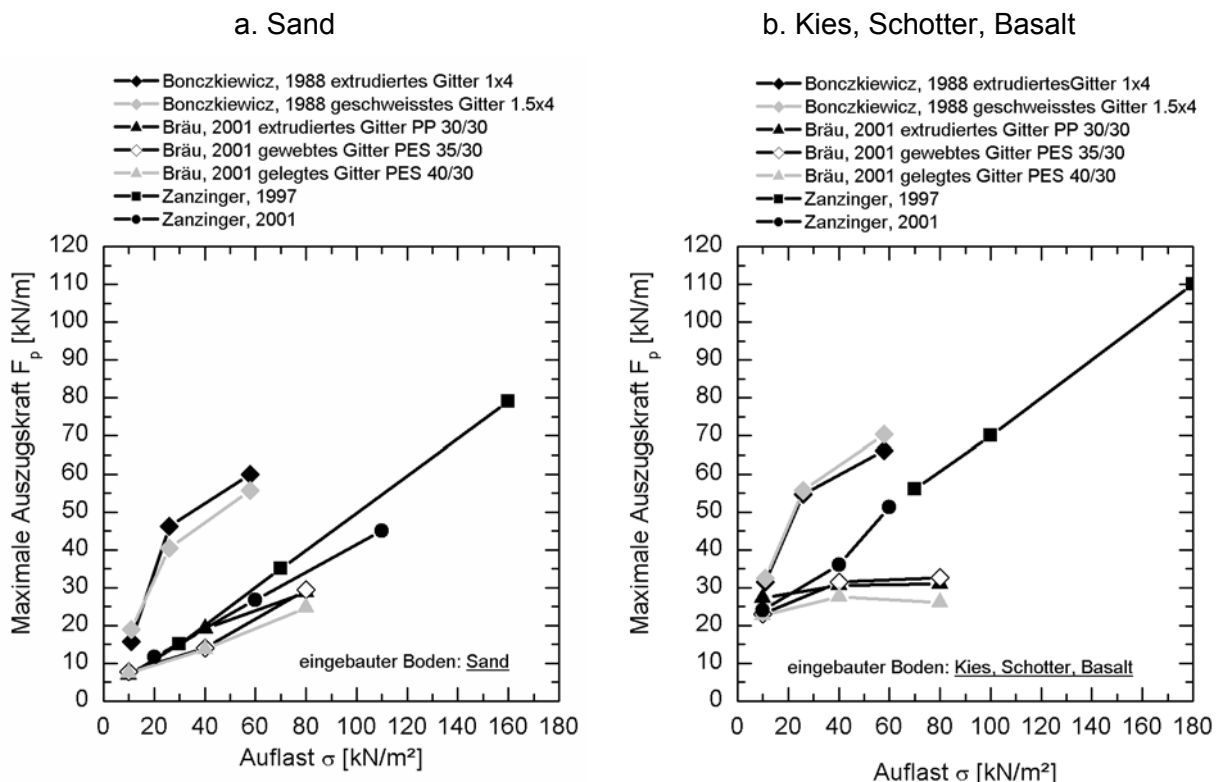


Bild 2.16: Einfluss der Auflast auf die maximale Auszugskraft, Zusammenstellung verschiedener Autoren

Aufgrund der dargestellten Zusammenhänge ist bei Geogittern in Schotter- und Kiesmaterialien in der Regel mit höheren Auszugskräften als bei Sanden zu rechnen. Bild 2.16 zeigt weiterhin, dass die Verzahnungswirkung bei größeren Erdstoffen bereits zu großen Höchstauszugswiderständen bei geringen Auflasten führt.

2.4.3.2.5 Bewehrungsbreite und Wandreibung

Durch Reibung des Erdstoffes an den Seitenwänden des Auszugskastens kommt es zu Verlusten der aufgetragenen Vertikalspannung, die sich in einer ungleichmäßigen Normalspannungsverteilung in der Grenzfläche zwischen Bewehrung und Erdstoff auswirken können. Exemplarisch sind in Bild 2.17 die Veränderungen der Höchstauszugskraft bei Variation der Probenbreite dargestellt. Im Verhältnis zur Kastenbreite breite Proben erzeugen dabei geringere Höchstauszugswiderstände als schmale Proben. Dies ist zum Teil auf eine zu den Seitenwänden aufgrund von Reibungsverlusten abfallende Normalspannungsverteilung zurückzuführen. Verlustmessungen in der Grenzfläche von Farrag et al. (1993) zeigen jedoch, dass bei einer Kastenbreite von 0,90 m die Verluste an Vertikalspannung bereits in einem Abstand von 0,18 m von den Wänden geringer als 2,5 % und daher vernachlässigbar sind.

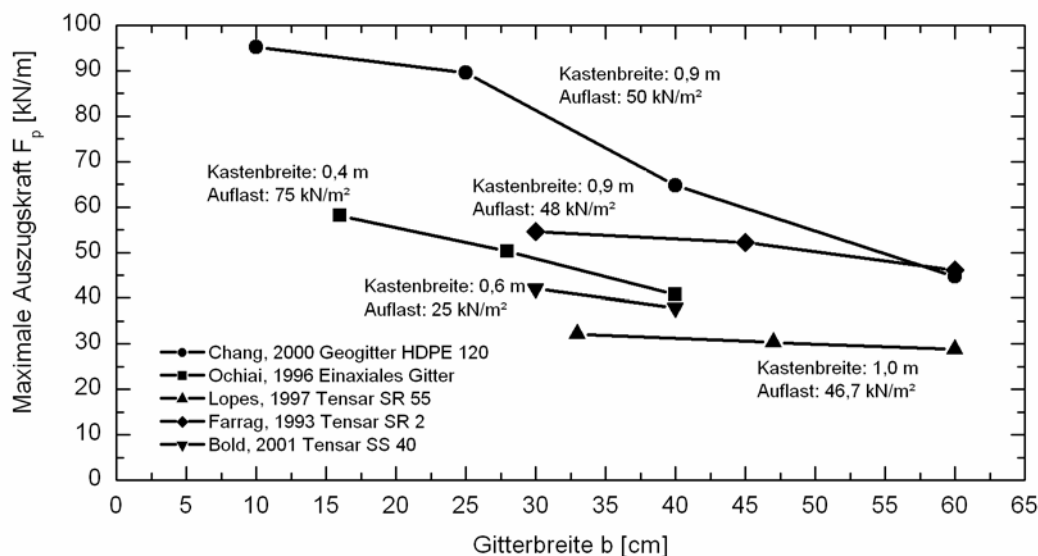


Bild 2.17: Einfluss der Probenbreite auf die maximale Auszugskraft, Zusammenstellung verschiedener Autoren

Zur Minimierung der dargestellten Effekte ist die Reduzierung der Wandreibung durch Anbringung reibungsmindernder Materialien wie Folie oder Teflonspray empfehlenswert.

Für die Abnahme der Auszugskraft mit zunehmender Bewehrungsbreite ist nach Alfaro et al. (1995) nicht nur die Wandreibung allein, sondern, insbesondere bei großen Einbaudichten, auch das Dilatanzverhalten des Bodens verantwortlich. Demnach setzt sich das Verbund-

verhalten zwischen Geogittern und Erdstoff aus einem zweidimensionalen und einem dreidimensionalen Verbundmechanismus zusammen, wobei der 2-D-Mechanismus den klassischen Reibungswiderstand und der 3-D-Mechanismus den Querstrebenabtrag bei Geogittern repräsentiert. Als Folge des 3-D-Mechanismus steigt dabei die Normalspannung an den Seiten der Bewehrung und erzeugt eine ungleichmäßige Spannungsverteilung über die Bewehrungsbreite mit Spannungsspitzen an den Rändern. Bei kleinen Gitterbreiten überlagern sich die Spannungserhöhungen beider Bewehrungsseiten, so dass es insgesamt zu einer Erhöhung der Auszugskraft kommt.

2.4.3.2.6 Einbindelänge der Bewehrung

Bei einer Vergrößerung der Einbindelänge der Bewehrung kommt es generell zu einer Zunahme der maximalen Auszugskraft F_p im Versuch. Bei geringen Auflasten von 10 kN/m^2 ist dabei nach Moraci et al. (2004) bei Untersuchungen gereckter Geogitter in einem Mittelsand mit einem näherungsweise linearen Anstieg der maximalen Auszugskraft zu rechnen, während die maximale Auszugskraft im Auflastbereich von 50 kN/m^2 unterproportional ansteigt (Bild 2.18). Ein vergleichbares Verhalten wird von Lopes et al. (1996) für einen ähnlichen Auflastbereich beschrieben. Watts und Brady (1990) berichten von Feld-Auszugsversuchen mit unterschiedlichen Geogittern und variierenden Bodenarten, in denen längenunabhängig ähnliche Verhältnisse von Scher- und Schubspannungen gemessen worden sind. Dies deutet ebenfalls auf einen annähernd linearen Anstieg der maximalen Auszugskraft mit der Einbindelänge hin. Hingegen beschreiben die Autoren, dass die Verschiebungen bis zum Erreichen der maximalen Auszugskraft bei einem gewebten Geogitter deutlich größer als bei einem gereckten Probenmaterial ausfielen.

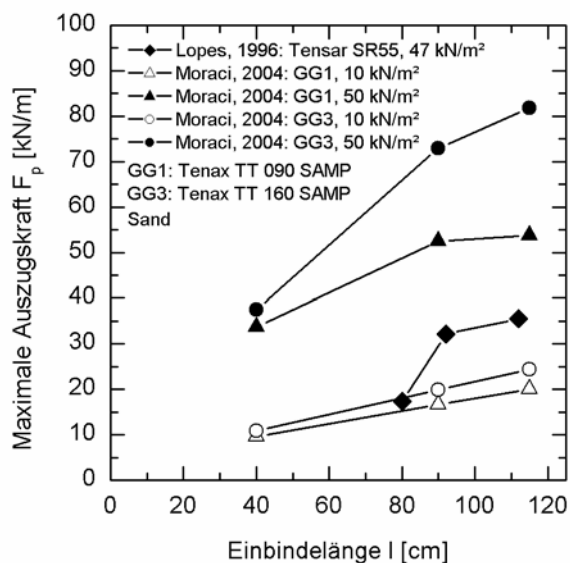


Bild 2.18:

Einfluss der Einbindelänge des Probenmaterials auf die maximale Auszugskraft, Zusammenstellung verschiedener Autoren

Nach Lopes et al. (1996) sind im Wesentlichen zwei Effekte für das beschriebene Verhalten im höheren Auflastbereich verantwortlich: Zum einen Auflockerungen der dichten Struktur

des eingebauten Erdstoffes durch die mit wachsender Einbindelänge größeren Verschiebungen, zum anderen eine größere gegenseitige Beeinflussung der lastabtragenden Querstreben bei steigender Einbindelänge. Auf die Vergrößerung der maximalen Verschiebung beim Peak s_p in Abhängigkeit von Einbindelänge und Auflast wird ausführlicher in Kapitel 4 eingegangen.

2.4.3.2.7 Schichtdicke des eingebauten Erdstoffes

Die Dimensionen des eingebauten Erdstoffpaketes beeinflussen das Verbundverhalten zwischen dem Erdstoff und der Bewehrung.

Geringe Erdstoffmächtigkeiten begünstigen den Effekt der eingeschränkten Dilatanz und vermindern die Auswirkungen von Reibungsverlusten an den Seitenwänden des Auszugskastens (Abschnitt 2.4.3.2.2). Aufgrund des geringen Abstandes des Probenmaterials zu den oberen und unteren Widerlagern (Lastverteilungsplatte und Kistenboden) wird eine Auflockerung des Erdstoffes stärker verhindert, und die Normalspannung in der Grenzfläche zwischen Erdstoff und Bewehrung steigt an. Geringe Überdeckungshöhen erhöhen demnach die maximalen Auszugskräfte (Bild 2.19).

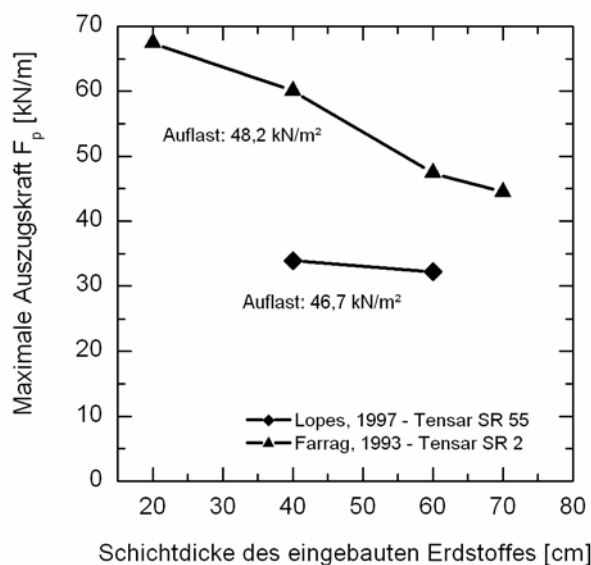


Bild 2.19:

Einfluss der Erdstoffmächtigkeit auf die maximale Auszugskraft, Zusammenstellung verschiedener Autoren

2.4.3.2.8 Auszugsgeschwindigkeit

Hinsichtlich des Einflusses der Auszugsgeschwindigkeit auf die maximale Auszugskraft liegen in der zur Verfügung stehenden Literatur unterschiedliche Erkenntnisse vor.

Insbesondere der passive Erdwiderstand nimmt mit zunehmender Auszugsgeschwindigkeit ab, da höhere Geschwindigkeiten die Einlagerung von Erdstoffpartikeln und die Neuordnung von Partikeln zueinander einschränken. Die damit verbundene Abnahme des Erdwiderstandes vor den Querstreben führt nach Chang et al. (1995) und Farrag et al. (1993) zu einer Abnahme des maximalen Auszugswiderstandes mit zunehmender Geschwindigkeit (Bild 2.20).

Nach Bolt und Duszynska (2000) sowie Lopes et al. (1996) kommt es mit zunehmender Geschwindigkeit zu einer Steigerung des maximalen Auszugswiderstandes. Dieses Phänomen kann durch den Aufbau eines Erddruckes auf die Vorderwand begründet werden, der zu einer Erhöhung der Normalspannungen im vorderen Probenbereich führt. Bei höheren Geschwindigkeiten wird demnach ein größerer Erdstoffanteil in den vorderen Bereich transportiert, so dass eine Gewölbebildung begünstigt wird.

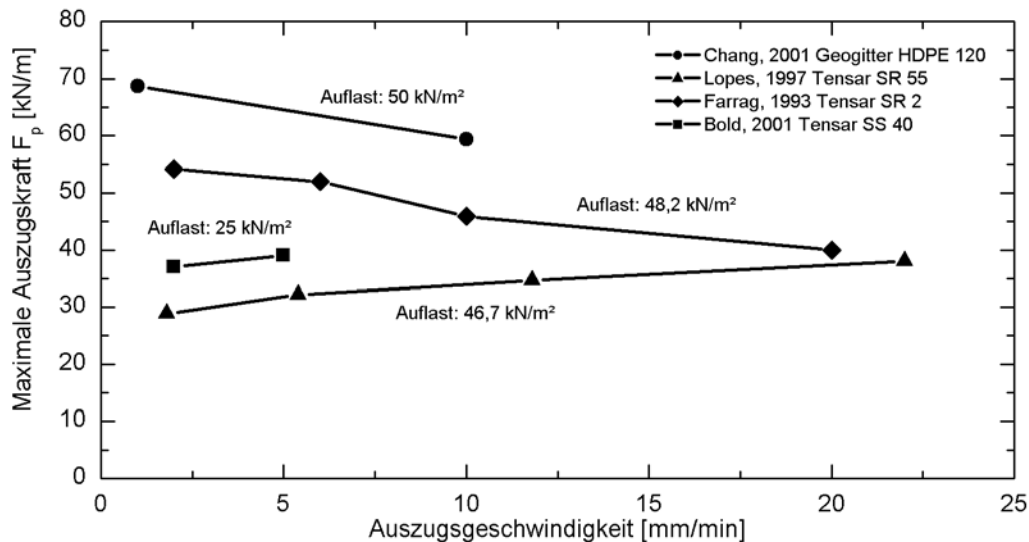


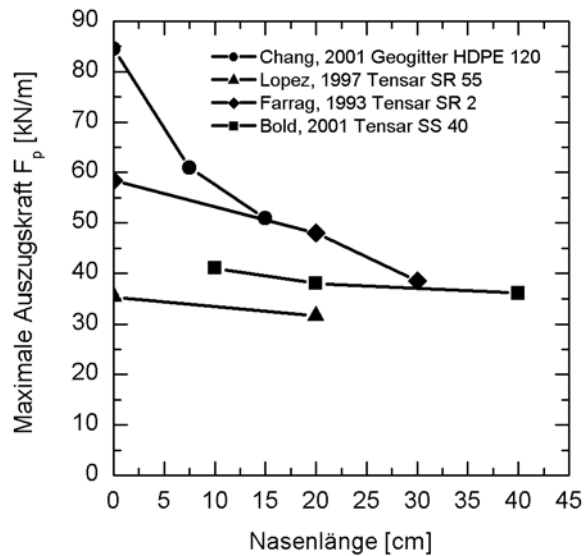
Bild 2.20: Entwicklung der maximalen Auszugskraft in Abhängigkeit der Auszugsgeschwindigkeit, Zusammenstellung verschiedener Autoren

Neben der Erhöhung der Normalspannung bewirkt eine Geschwindigkeitserhöhung nach Lopes et al. (1996) zusätzlich eine Erhöhung der Bewehrungssteifigkeit, was zu einer gleichmäßigeren Lastabtragung des Bewehrungsmaterials sowie zu einer Aktivierung eines größeren Probenanteils führt. Die dabei vergrößerte Anzahl aktivierter Querstreben kann zu einem Anstieg der maximalen Auszugskraft führen.

2.4.3.2.9 Konstruktion der Frontwand

Die Frontwand des Auszugskastens stellt eine wichtige Randbedingung dar, da es beim Zugvorgang der Probe in Richtung der Frontwand zu einer Gewölbebildung im Bereich der Frontwand kommt, die zu einer Normalspannungserhöhung im vorderen Bereich der Probe führt. Die maximalen Auszugskräfte vergrößern sich aufgrund dieser Randbedingung.

Um den Erddruck an der Frontwand zu minimieren und die eingeleitete Auszugskraft in das Kasteninnere zu verlagern, können an der Frontwand ober- und unterhalb der Proben Stahlplatten angebracht werden, die je nach Kastengröße bis zu 40 cm in den Erdkörper hineinragen. Sie werden als „Nase“ bezeichnet.

**Bild 2.21:**

Einfluss der Länge einer abschirmenden Nasenkonstruktion an der Frontwand auf die maximale Auszugskraft, Zusammenstellung verschiedener Autoren

Dem Bild 2.21 ist zu entnehmen, dass diese Nasenkonstruktionen mit zunehmender Länge die maximalen Auszugskräfte reduzieren, da der Aufbau eines abstützenden Gewölbes an der Frontwand erschwert wird.

2.4.3.2.10 Klemmung

Zur Verbindung der Probe mit der horizontalen Belastungseinrichtung ist eine Klemmung notwendig, die das Probenmaterial möglichst wenig beschädigt und die Last in die Probe gleichmäßig einleitet.

Großteils werden Flachklemmen verwendet, in denen die Probe zwischen zwei Stahlplatten eingeklemmt wird (Alfaro et al., 1995; Farrag et al., 1993; Min et al., 1995). Diese Klemmung wird in der Regel für gereckte und extrudierte Materialien verwendet, während für gewebte Proben Rollenklemmen herangezogen werden, bei denen die Probe auf einem Metallzylinder aufgerollt wird (Bolt und Duszynska, 2000). Die Gefahr eines Herausrutschens der Probe aus der Klemme wird minimiert und die Lasteinleitung vergleichmäßig.

Die Klemme wird bei verschiedenen Versuchsanordnungen unterschiedlich positioniert: Einige Autoren beschreiben Versuchsgерäte mit einer Klemmung außerhalb des Versuchskastens (Bolt und Duszynska, 2000; Ochiai et al., 1992), während eine Klemmung innerhalb der Nasenkonstruktion oder direkt im Erdstoff von anderen Autoren genannt wird (Farrag et al., 1993; Lopes und Ladeira, 1996). Eine Klemmung außerhalb des Versuchskastens führt nach Farrag et al. (1993) zu einer Verschmelzung von Effekten aus der freien und der eingebetteten Probenlänge, während bei einer Innenklemmung die gesamte Probenlänge von Erdstoff umgeben ist. Hingegen ist bei einer Innenklemmung eine Flachklemme zu verwenden, so dass gewebte Materialien schwieriger zu untersuchen sind.

Bei horizontal zyklischen Auszugsversuchen ist von Min et al. (1995) eine Innenklemmung verwendet worden, während Yasuda et al. (1992) und Raju (1995) die Probenmaterialien außerhalb des Versuchskastens mit der Belastungseinrichtung verbunden haben. Bei höheren Frequenzen oder einer großen Anzahl von Lastspielen besteht bei innenliegender Klemmung die Gefahr einer Auflockerung des Erdstoffes im klemmennahen Bereich.

2.4.3.3 Auswertung zyklischer Versuche

2.4.3.3.1 Einführung

Neben den bereits in Abschnitt 2.4.3.2 vorgestellten Einflussfaktoren werden die Ergebnisse zyklischer Auszugsversuche von weiteren Faktoren beeinflusst, die als belastungsbedingte Faktoren bezeichnet werden. Dazu zählen die Art der zyklischen Belastung (horizontale oder vertikale zyklische Lastaufbringung), das Belastungsniveau (Größenordnung der Oberlast), die Amplitude (Differenz zwischen Ober- und Unterlast), die Belastungsfrequenz sowie die Anzahl der aufgetragenen Lastspiele.

Aufgrund der geringen Anzahl bisher durchgeführter Auszugsversuche mit zyklischer Lasteinwirkung und der Variabilität der Versuchskonzepte ist eine Extrahierung einzelner Parameter nur unzureichend möglich. Daher werden im Folgenden einzelne Belastungsarten mit dem Schwerpunkt der horizontal zyklischen Belastung ausgewertet.

2.4.3.3.2 Vertikal zyklische Belastung

Yasuda et al. (1992) untersuchten den Einfluss vertikaler Zyklen auf das Auszugsverhalten von uniaxialen und biaxialen gereckten Geogittern in Sand und zwei Vulkanaschen. Dabei kam ein Pull-Out-Gerät mit einer Länge von 0,50 m, einer Breite von 0,30 m und einer Füllmächtigkeit von 0,10 m zur Anwendung.

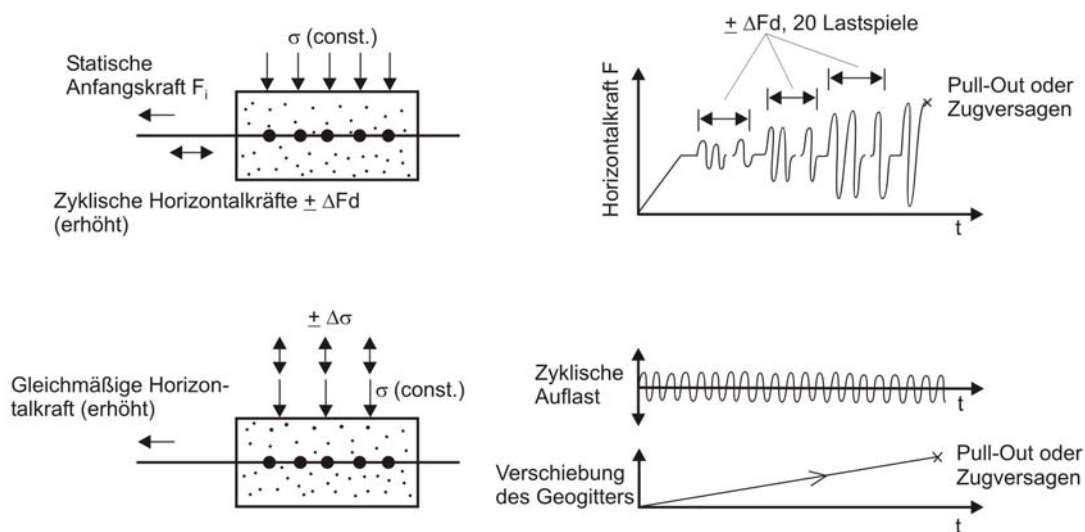
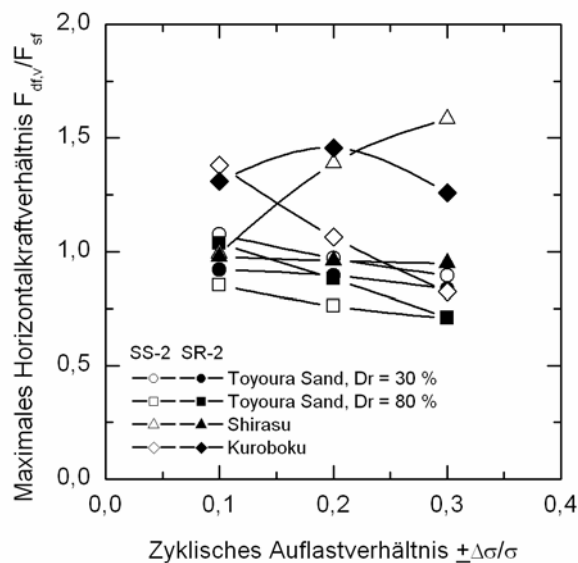


Bild 2.22: Durchführung horizontal (oben) und vertikal (unten) zyklischer Auszugsversuche, nach Yasuda et al. (1992)

**Bild 2.23:**

Beziehung zwischen den maximalen horizontalen Auszugskraft-Verhältnissen und dem zyklischen Auflastverhältnis im Versuch mit zyklischen Auflasten, nach Yasuda et al. (1992)

In vertikaler Richtung wurde eine statische Grundspannung σ_n mittels Luftkissen aufgebracht und mit einer zyklischen Spannung $\pm \Delta\sigma$ in der Größenordnung von 10 bis 30 % der statischen Grundspannung überlagert. Zeitgleich wurde die Probe in horizontaler Richtung weggesteuert herausgezogen und die horizontale Maximalkraft ermittelt (Bild 2.22, unterer Teil). Mit Vergrößerung von $\Delta\sigma_n$ wurde dabei eine Abnahme der maximalen Horizontalkraft beim Sand von 100 % der statischen Auszugskraft bei $\pm \Delta\sigma/\sigma = 0$ bis etwa 80 % bei $\pm \Delta\sigma/\sigma = 0,3$ ermittelt (Bild 2.23). Die Ursache ist nach Meinung der Autoren darin zu suchen, dass zu den Zeitpunkten, an denen $\Delta\sigma_n$ negativ ist, eine geringere Vertikalspannung auf der Probe lastet als beim statischen Vergleichsversuch und daher in horizontaler Richtung geringere maximale Kräfte aufgebracht werden können.

Bei den verwendeten Vulkanaschen konnte mit dieser Versuchsanordnung keine eindeutige Aussage abgeleitet werden.

2.4.3.3.3 Horizontal zyklische Belastung

Raju und Fannin (1997) führten sowohl statische als auch zyklische Auszugsversuche an drei verschiedenen Geogittern in Sand durch, wobei ein Pull-Out-Gerät mit einer Länge von 1,30 m, einer Breite von 0,64 m und einer Höhe von 0,60 m zum Einsatz kam. Die statischen Versuche wurden bei drei verschiedenen Auflasten zwischen 4 und 20 kN/m², die zyklischen Versuche bei zwei verschiedenen Frequenzen (0,01 und 0,1 Hz), unterschiedlichen Amplituden und Lastniveaus durchgeführt.

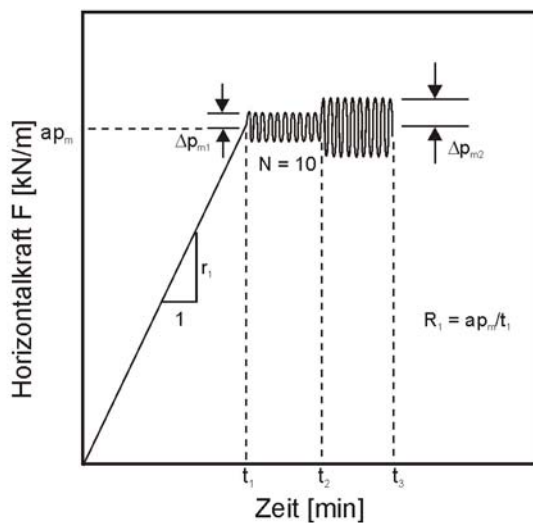


Bild 2.24: Versuchsdurchführung der horizontalen zyklichen Auszugsversuche, nach Raju und Fannin (1997)

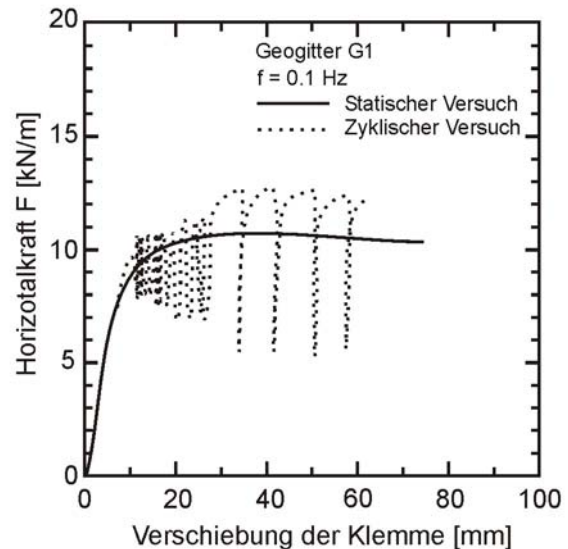


Bild 2.25: Horizontalkraft eines horizontalen zyklichen Versuches mit einer Auflast von 10 kN/m^2 , nach Raju und Fannin (1997)

Beim zyklischen Versuch wird zunächst eine Horizontalkraft ap_m aufgebracht, die einem Belastungsniveau von 60 – 90 % der Höchstauszugskraft des statischen Referenzversuches entspricht. Anschließend werden jeweils 10 Lastspiele mit einer konstanten Amplitude aufgebracht, wobei die Amplitude jeweils in Stufen erhöht wird, bis es zu einem Herausziehen der Probe kommt (Bild 2.24).

Der Vergleich der maximalen Auszugskräfte aus statischen und zyklischen Versuchen zeigt materialabhängig ähnliche Größenordnungen (Bild 2.25); die zyklischen Auszugskräfte waren bei einem Geogitter sogar geringfügig höher als beim weggesteuerten Versuch. Eine Änderung der Frequenz von 0,1 auf 0,01 Hz führte nur zu marginalen Auswirkungen, während sich eine Amplitudenänderung deutlich auf die Verschiebungen des Probenmaterials auswirkte. Mit steigender Anzahl von Lastspielen nahmen die Verschiebungsinkremente pro Lastspiel dabei ab. Dieses Verhalten wurde von den Autoren als „stabiles Verhalten“ der Geogitter bezeichnet, da kein plötzliches Herausziehen der Proben zu erwarten war.

Die Auswertung der Versuche und die Beurteilung über ein stabiles oder instabiles Verhalten erfolgte durch das Auftragen der Lastspiele über die an der Klemmenseite ermittelten Verschiebungen des Geogitters. Zusätzlich wurden die Verschiebungen am Ende des Geogitters herangezogen. Bei einem gleichmäßigen Verhalten beider Enden liegt dabei eine Starrkörperverschiebung vor, bei sehr viel größeren Verschiebungen an der Klemmenseite als am Ende der Probe wird das Verhalten als stabil definiert, da es sich vorwiegend um Dehnungen im Material handelt.

Da es sich um Stufenversuche mit nur jeweils 10 Lastspielen pro Belastungsstufe handelt, ist die Aussagekraft der Versuche eingeschränkt, da über das Langzeitverhalten keine Daten vorliegen. Die Verwendung einer Regelfrequenz von 0,01 Hz erscheint für die Abbildung realistischer Verkehrsbeanspruchungen gering.

Min et al. (1995) legen den Schwerpunkt ihrer Untersuchungen auf die Ermittlung des Kriechverhaltens des Bewehrungsmaterials. Dazu wurden statische und zyklische Langzeitversuche an einem biaxialen Geogitter im Sand in einem Versuchskasten mit den Innenabmessungen 0,60 m x 0,30 m x 0,30 m (Länge x Breite x Höhe) durchgeführt.

Bei der Durchführung der statischen Versuche wurde eine Horizontalkraft aufgebracht, die jeweils für 24 Stunden konstant gehalten und dabei schrittweise bis zum Herausziehen erhöht wurde. Die Horizontalkraft während der Auszugsphase wurde dabei als Höchstauszugskraft definiert.

Bei den zyklischen Versuchen an der Luft wurden Frequenzen (0,1 und 0,5 Hz) und die Amplitude variiert, bei den im Boden eingebetteten Versuchen die Auflast und die Amplitude bei einer Frequenz von 0,5 Hz. Die zyklischen Tests wurden dabei auch als Stufenversuche durchgeführt, bei denen auf eine initiale Horizontalkraft für 24 Stunden Lastspiele aufgebracht wurden und nach 24 Stunden die Grundlast jeweils erhöht wurde, bis es zu einem Herausziehen kam (Bild 2.26).

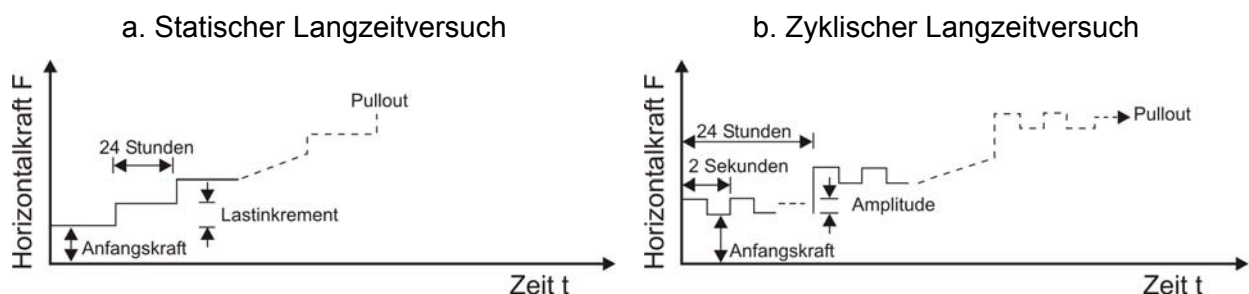


Bild 2.26: Versuchsdurchführung der Langzeitversuche, nach Min (1995)

Bei der Durchführung der Versuche an der Luft waren die in den weggesteuerten Versuchen ermittelten Verformungen und das Kriechen, bezogen auf das vordere Ende des Geogitters, deutlich größer als die der zyklischen Versuche. Die Kriechverformungen nahmen in den weggesteuerten Versuchen mit steigender Auszugskraft und in den zyklischen Versuchen mit steigender Amplitude deutlich zu. Ein Einfluss der Frequenzen konnte bei keinem der Versuche festgestellt werden.

Bei den zyklischen Versuchen im Boden nahmen die ermittelten Dehnungen und das Kriechen mit steigender horizontaler Grundlast und mit steigender Amplitude deutlich zu, waren jedoch insgesamt kleiner als in den Tests an der Luft. Der umgebende Boden führte dazu, dass die aufgebrachten Horizontalkräfte zunächst nur in einen kleinen vorderen Bereich des

Geogitters eingeleitet wurden, während an der Luft das gesamte Gitter belastet wird. Eine Abhängigkeit des Kriechverhaltens von der aufgetragenen Auflast konnte nicht festgestellt werden. Zur Ermittlung des Kriechverhaltens ist es nach Ansicht der Autoren ausreichend, Zugversuche durchzuführen.

Bei einem Vergleich der statischen und zyklischen Versuchsergebnisse zeigte sich, dass die ermittelten Dehnungen in den zyklischen Versuchen um bis zu 20 % geringer waren als bei den statischen Versuchen. Während die Dehnungen in den statischen Versuchen vorwiegend in einem vorderen Bereich des Geogitters auftraten, konnten diese bei den zyklischen Versuchen über die gesamte Gitterlänge gemessen werden.

Auch von Min et al. (1995) wurde der Versagenszustand bei zyklischen Versuchen als progressiv beschrieben.

Yasuda et al. (1992) bringen bei konstanter vertikaler Spannung in horizontaler Richtung ausgehend von einer Grundlast Lastspiele auf, wobei die Amplitude nach jeweils 20 Lastspielen erhöht wird, bis es zu einem Herausziehen der Probe kommt (Bild 2.22, oberer Teil). Dabei ergeben sich im Sand maximale dynamische Auszugskräfte, die um bis zu 50 % größer sind als die vergleichbaren statischen Höchstauszugskräfte. Im locker gelagerten Sand steigen die Werte dabei am deutlichsten an. Die Autoren vermuten als Ursache eine Nachverdichtung des eingebauten Erdstoffes durch die Lastspiele.

Hanna und Touahmia (1991) beschreiben statische und zyklische Auszugsversuche an einem glatten Stahlblech, einem gerippten Stahlblech und einem gereckten Geogitter in Sand bei 0,05 Hz, wobei bei den zyklischen Tests die Amplituden und Lastniveaus variiert wurden. Zum Einsatz kam ein Pull-Out-Gerät mit Innenmaßen von 4,00 m in der Länge und 0,30 m in der Höhe.

Bei den weggesteuerten Auszugsversuchen konnte für das Geogitter aufgrund der Verankerungslänge nur ein Zugversagen festgestellt werden. Die gemessenen Verschiebungen zum Peakzeitpunkt sind beim glatten Stahlblech mit etwa 2,5 mm am geringsten, während sie beim Geogitter zum Zeitpunkt des Zugversagens etwa die 10fache Größenordnung besaßen.

Bei den zyklischen Versuchen wurden bei einer konstanten Auflast bis zu 100.000 Lastspiele mit variablen Unter- und Oberlasten aufgebracht. Im Anschluss erfolgte bei Nichtversagen im Rahmen der Zyklen ein weggesteuertes Herausziehen der Probe.

Zur Auswertung wurden die absoluten Verschiebungen sowie die Verschiebungsinkremente pro Zyklus über die logarithmische Anzahl der aufgetragenen Lastspiele aufgetragen. Eine fortwährende Abnahme der Verschiebungsinkremente wurde dabei als stabiles Materialverhalten definiert.

Der glatte Stahlstreifen erzeugte bei zunächst konstanten Zuwächsen der Verschiebungen plötzliche Versagensfälle innerhalb weniger Lastspiele, wobei das Material auf seiner gesamten Länge mobilisiert wurde (Bild 2.27). Das Verformungsniveau war dabei sehr niedrig. Beim gerippten Stahlstreifen und beim Geogitter konnte entsprechend der Definition kein Versagensverhalten festgestellt werden, obwohl das Verformungsniveau – vor allem beim Geogitter – deutlich oberhalb des Niveaus beim glatten Stahlblech angesiedelt war. Zu beobachten war lediglich eine Aktivierung der vorderen Probenbereiche.

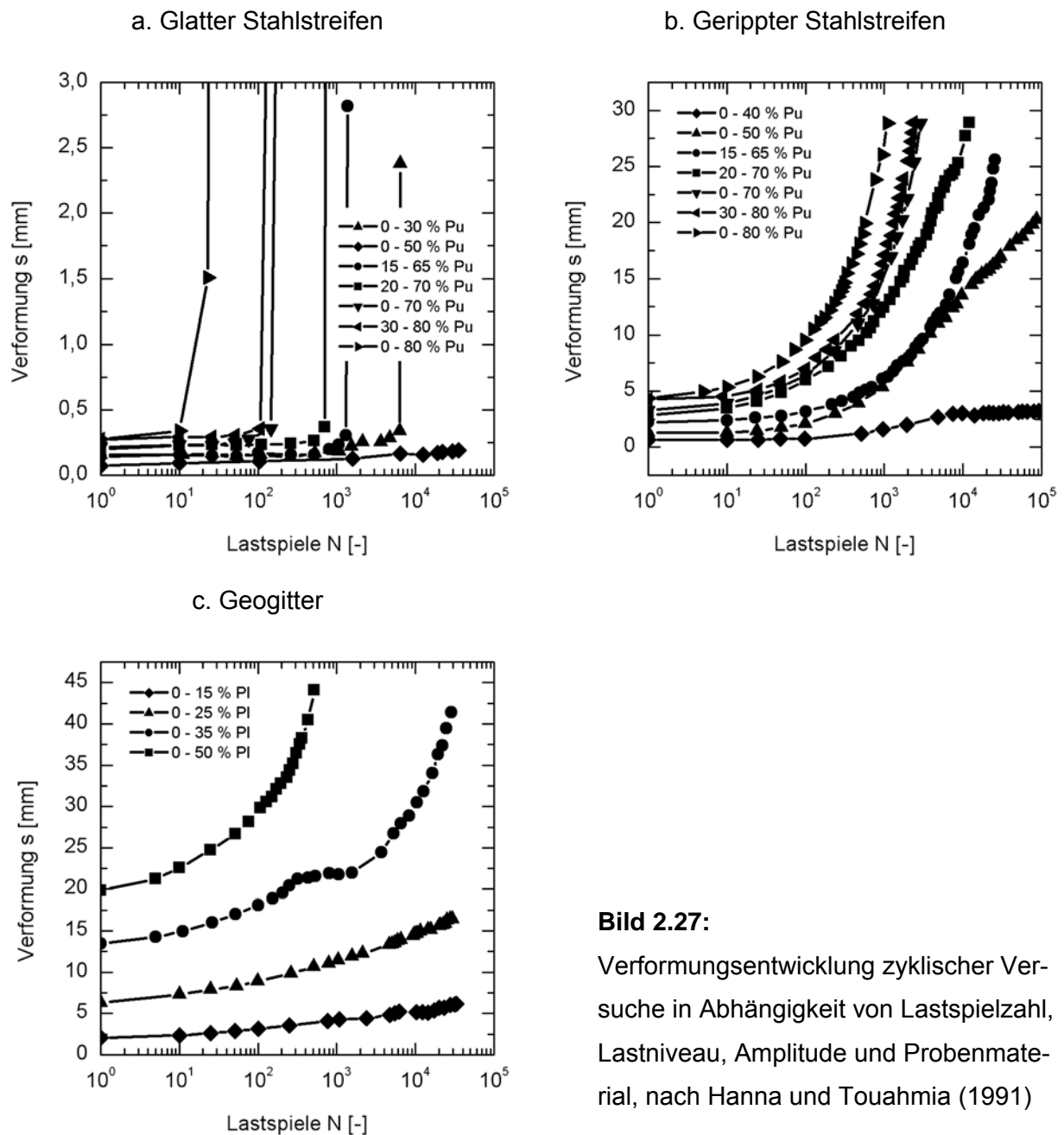


Bild 2.27:

Verformungsentwicklung zyklischer Versuche in Abhängigkeit von Lastspielzahl, Lastniveau, Amplitude und Probenmaterial, nach Hanna und Touahmia (1991)

Zur Lastabtragung der beschriebenen Versuche werden in Al-Ashou und Hanna (1990) weitergehende Angaben gemacht.

Der Versuchsaufbau und –ablauf von Hanna und Touahmia (1991) lässt eine fundierte Aussage über das Materialverhalten im Verbund zu. Da jedoch nur vier Versuche mit Geokunststoffen durchgeführt worden sind, ist die Datenbasis für eine Aussage zum Einflussverhalten verschiedener Einflussparameter nicht ausreichend.

2.4.3.3.4 Kombinierte zyklische Belastungen

Nimmegern und Bush (1991) führten zwei Auszugsversuche mit gleichzeitiger vertikaler und horizontaler zyklischer Belastung mit einer Frequenz von 5 Hz an uniaxial gestreckten Geogittern in einem Kiesmaterial durch. Dabei wurde ein Pull-Out-Gerät mit den Innenabmessungen 2,00 m x 1,00 m x 1,00 m (Länge x Breite x Höhe) verwendet.

Beide Versuche wurden mit gleichbleibender vertikaler Grundlast und Amplitude sowie konstanter horizontaler Amplitude mit variabler horizontaler Grundlast durchgeführt. Dabei wurden 162.000 bzw. 171.000 Lastspiele aufgebracht. Es konnte kein Herausziehen des Geogitters aus dem Boden festgestellt werden, jedoch wiesen die Verschiebungen in den ersten Versuchsminuten einen sehr schnellen Anstieg auf, um sich mit zunehmender Versuchsdauer einem relativ konstanten Niveau zu nähern.

Bei beiden Versuchen konnten zu Beginn geringfügige Setzungen des Erdstoffes von ca. 0,10 % aufgrund der vertikalen Belastung beobachtet werden, die sich nach ca. 18.000 Zyklen jedoch nicht fortsetzten.

2.4.3.4 In-Situ Auszugsversuche

Schlosser und Elias (1978) berichten von Untersuchungen in den USA und Frankreich, bei denen Auszugsversuche an Stahlbewehrungen bis zu einer Länge von 8,00 m durchgeführt worden sind, um den Einfluss der Einbindelänge bei diesen dehnsteifen Materialien zu untersuchen. Die Tests zeigen unabhängig von der Überdeckungshöhe einen Anstieg der Scherspannungen bei einer Erhöhung der Einbindelänge, was durch Randeffekte erklärt wird. Zur Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung bei Auszugsversuchen zeigen die Autoren einen Versuchsaufbau, bei dem vier Bewehrungslagen übereinander zeitgleich aus dem Boden gezogen werden.

Watts und Brady (1990) berichten von zwei Testobjekten, bei denen Proben von einem Meter Breite und Einbindelängen von 0,5 bis 1,6 m bei einer Überdeckung von 1,20 m aus einem Kleiboden gezogen werden. Diese Untersuchungen zeigen, dass die Verschiebung bis zum Erreichen der Höchstauszugskraft mit wachsender Einbindelänge ansteigt.

Ochiai et al. (1996) untersuchen bei In-Situ-Auszugsversuchen an einer 5 m hohen Sandböschung die Verschiebungen und Dehnungen an Proben von 2 und 4 m Länge in Tiefenlagen von einem bis 4 Metern. Gerade bei dehnsteifen Materialien erlauben große Einbindelängen eine exaktere Untersuchung der Materialdehnungen und der Aktivierung einzelner Proben-

abschnitte. Zu beachten ist allerdings, dass es bereits bei geringen Auflasten zu einem Zugversagen der Probe kommen kann.

Aufwändige In-Situ-Tests mit großen Einbindelängen eignen sich daher im Wesentlichen, wenn neben den Auszugskräften zusätzlich auch Angaben über Materialdehnungen von Interesse sind.

2.4.3.5 Eignung des Auszugsversuches

Nach Juran et al. (1988) ist es von besonderer Relevanz, für die Untersuchung des Interaktionsverhaltens zwischen Erdstoff und Bewehrungsmaterial denjenigen Test auszuwählen, welcher die Feldbedingungen am besten simuliert. Aus diesem Grund empfiehlt diese Autorengruppe den Auszugsversuch für Bewehrungsanwendungen im Boden.

Beim Auszugsversuch handelt sich prinzipiell um einen einfachen Versuchsaufbau, bei dem der Probeneinbau preisgünstig durchzuführen ist. Die Größe des Versuchskastens kann variabel entsprechend der Zielstellung gewählt werden. Für zyklische Versuche lassen sich Lastspiele sowohl in vertikaler wie in horizontaler Richtung aufbringen (siehe Abschnitt 2.4.3.3); auch Untersuchungen mit einer kombinierten zyklischen Belastung sind möglich. Die Randbedingungen des Einbauzustandes wie z.B. die Auflast und die Einbindelänge lassen sich im Versuch simulieren. Aufgrund der problemlosen Durchführung eignet sich der Auszugsversuch insbesondere für Reihenuntersuchungen, bei denen die Auswirkungen verschiedener Parameter untersucht werden sollen. Es können alle wesentlichen Erdstoffe und Geokunststoffe in den Versuchsstand eingebaut und untersucht werden.

Im Auszugsversuch können neben den Horizontalkräften auch die Dehnungen des Bewehrungsmaterials ermittelt und damit Aussagen über die Lastabtragung im Boden getroffen werden. Nach Farrag et al. (1993) sind diese Angaben für die Modellierung des Auszugsverhaltens unabdingbar.

Die Vielzahl der Einflussparameter (siehe Abschnitte 2.4.3.2 und 2.4.3.3) erschweren einen Vergleich von Auszugsversuchen verschiedener Gerätetypen. Nach Lopes und Ladeira (1996) sowie Farrag et al. (1993) ist eine Standardisierung des Versuchsstandes sowie der Versuchsdurchführung daher unabdingbar. Werden jedoch die wesentlichen Einflüsse bestimmter Parameter anhand der Literaturstudie berücksichtigt, so können deren Auswirkungen auf die Versuchsergebnisse minimiert werden. Aufgrund vergleichbarer Randbedingungen werden die Einflüsse im Rahmen einer Versuchsserie weitgehend eliminiert. Da eine Innenklemmung aufgrund der Erkenntnisse in Abschnitt 2.4.3.2.10 nicht praktikabel für alle Geokunststofftypen ist, beeinflusst eine „freie Länge“ zwischen der Klemme außerhalb des Versuchskastens und dem Erdstoff das Ergebnis. Werden jedoch die Verschiebungen auch innerhalb des Bodenkörpers gemessen, so können Dehnungseffekte minimiert werden.

Als problematisch wurden in der Literaturstudie die Effekte aus Dilatanz bzw. Kontraktanz des Erdstoffes beschrieben, da in der Regel der obere Kastenteil aufgrund des Versuchsaufbaus im Gegensatz zum direkten Scherversuch vertikal unverschieblich gelagert ist. Eine näherungsweise Erfassung der Einflüsse dieses Bodenverhaltens auf die Normalspannungen in der Scherfuge erlaubt eine Berücksichtigung entsprechender Effekte.

Schlosser und Elias (1978) geben zu Bedenken, dass beim Auszugsversuch die gegenseitige Beeinflussung der Geokunststofflagen (Gruppenwirkung) nicht ausreichend berücksichtigt werden kann, wobei es im Rahmen einer Parameterstudie jedoch sicherlich von Vorteil ist, weitere Einflussparameter in den Untersuchungen zunächst zu eliminieren.

Nachteilig wirkt sich bei direkten Scherversuchen die Tatsache aus, dass es zu einer Starrkörperverschiebung in der Grenzfläche kommt. Nach Farrag et al. (1993) ist die Berücksichtigung der Geokunststoffdehnung bei der Ermittlung des Verbundverhaltens jedoch notwendig, da sie in erheblichem Maße mit der Lastabtragung korrespondiert. Der Interaktionsmechanismus bei direkten Scherversuchen und Auszugsversuchen bildet sich unterschiedlich aus: Während bei direkten Scherversuchen von einer Verschiebung auf einer Gleitfläche gesprochen werden kann, handelt es sich bei Auszugsversuchen um einen Auszug aus einer Verankerung. Bei geschlossenen Strukturen sind diese Interaktionsmechanismen weitgehend vergleichbar, während ein direkter Scherversuch bei Gitterstrukturen keine adäquate Aussage zum Verankerungsverhalten des Geokunststoffes im Boden erlaubt. Nach Zanzinger (1997) werden zum einen die relevanten Lastabtragungsmechanismen vor den Querstreben unzureichend berücksichtigt, zum anderen kommt es zu einer großflächigen Reibung von Boden auf Boden durch die Öffnungen der Gitterstruktur hindurch. Bei der üblichen Berücksichtigung einer doppelseitigen Scherfestigkeit können dadurch höhere Grenzwiderstände ermittelt werden als tatsächlich übertragbar sind.

Aufgrund der vorgestellten Versuchscharakteristik ist die Durchführung direkter Scherversuche mit zyklischen Lastkomponenten nur in vertikaler Richtung möglich. Eine Simulation der Auswirkungen einer horizontalen Belastung im Bewehrungsmaterial auf die Interaktionseigenschaften kann nicht durchgeführt werden.

Aufgrund der vorgestellten Randbedingungen ist der Auszugsversuch besser für die vorliegende Aufgabenstellung geeignet als der direkte Scherversuch.

2.4.4 Zyklische Versuchsvarianten

Als weitere Versuchsvariante zur Untersuchung des Verbundverhaltens von Erdstoff und Geokunststoff unter Einfluss zyklischer Beanspruchungen wird von Herold und Mannsbart (1997) sowie Herold (1999) ein Kreisringschergerät für die Beprobung von Vliesen und Ge-

weben vorgestellt. Zusätzlich zu einer statischen Auflastspannung kann dabei in vertikaler Richtung eine Schwelllastkomponente mit Frequenzen bis zu 100 Hz aufgebracht werden. Untersuchungen an Vliesen zeigen dabei einen sehr geringen Einfluss der Frequenz auf die Bruchscherfestigkeit. Die Autoren schlagen vor, die Auswirkungen des Lastniveaus über einen Abminderungsfaktor auf den statischen Verbundbeiwert zu berücksichtigen.

2.5 Langzeitverhalten

2.5.1 Langzeitverhalten in statischen In-Air-Untersuchungen

Kunststoffprodukte sind einer zeitabhängigen Veränderung ihrer Materialstruktur unterlegen. Aus diesem Grunde wird in DIN EN ISO 13431 die Bestimmung des Zugkriech- und Zeitstandbruchverhaltens für Geokunststoffe in einem In-Air-Versuch geregelt. Wesentliche Einflussparameter auf das viskoelastische Verhalten der Materialien sind der verwendete Rohstoff und die Polymerstruktur, die Struktur bzw. Produktionsart des Geokunststoffes, die Zeit, das Lastniveau und die Temperatur (Moraci und Montanelli, 1996).

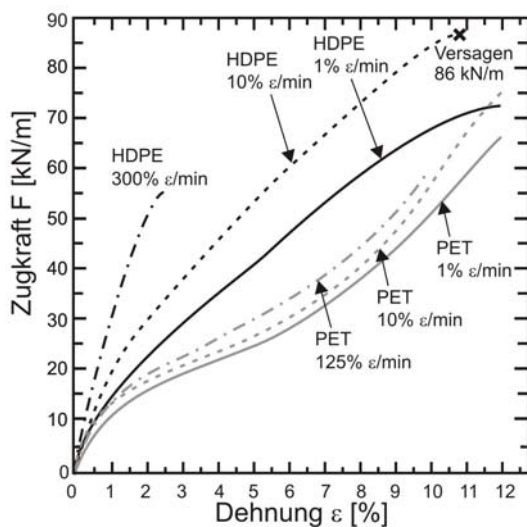


Bild 2.28:

Kraft-Dehnungsverhalten unterschiedlicher Geogitter in Abhängigkeit des Rohstoffes und der Belastungsgeschwindigkeit, nach Bathurst und Cai (1994)

Dem Bild 2.28 ist zu entnehmen, dass ein Geogitter aus PET bei gleichen Dehnungen eine signifikant geringere Zugkraft aufnehmen kann als ein Geogitter aus HDPE. Bei einer Verringerung der Dehnungsgeschwindigkeit (respektive Verlängerung der Belastungsdauer) verändert sich die aufnehmbare Zugkraft bei dem PET-Produkt hingegen nur marginal, während bei dem HDPE-Geogitter ein deutlicher Abfall der Zugkraftaufnahme zu verzeichnen ist (Bathurst und Cai, 1994). Auch Grote und Feldhusen (2004) beurteilen das Zeitstandsverhalten des Rohstoffes PET als gut. Müller-Rochholz und Recker (1996) ermitteln bei einem extrudierten Geogitter aus HDPE nach 1000 h deutlich größere Dehnungen gegenüber dem

Kurzzeitversuch, während die Dehnungserhöhungen bei einem gewebten Geogitter aus PET nur geringfügig über denen des Kurzzeitversuches lagen.

Den Einfluss von Struktur und Produktionsart des Geokunststoffes zeigen Moraci und Montanelli (1996) anhand eines gewebten PET-Geogitters und eines extrudierten HDPE-Geogitters: Beim gewebten Geogitter waren etwa 75 % der gesamten zeitabhängigen Dehnungen auf Strukturverformungen zurückzuführen, während beim extrudierten Material im Wesentlichen das viskoelastische Materialverhalten für die zeitabhängigen Dehnungen verantwortlich war.

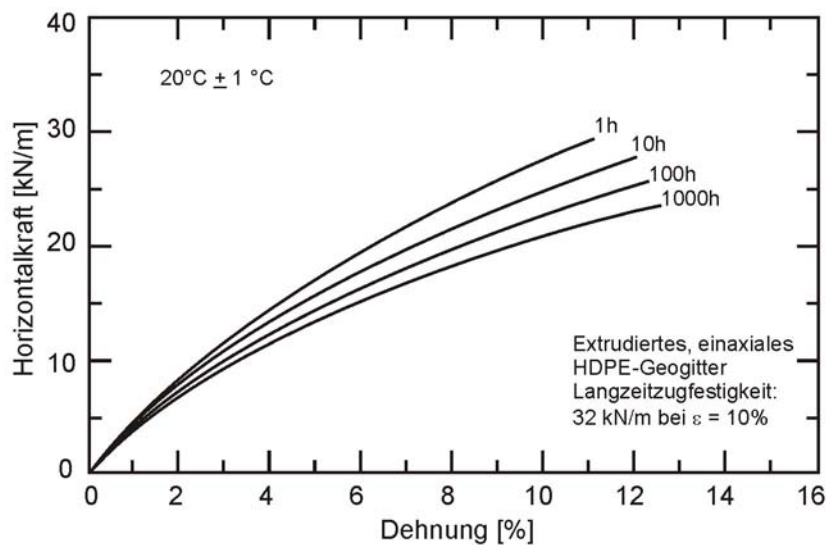


Bild 2.29: Last-Dehnungs-Isochronen für ein einaxiales Geogitter, nach Fannin und Hermann (1991)

Der Einfluss des Zeitparameters auf das Kraft-Dehnungsverhalten lässt sich besonders anschaulich den isochronen Kriechkurven entsprechend Bild 2.29 entnehmen: Besonders starke Kriecheffekte sind dabei zu Beginn der Belastung zu erwarten.

Die deutliche Spreizung der isochronen Kriechkurven im höheren Belastungsbereich charakterisiert den überproportionalen Einfluss des Lastniveaus auf das Zeitstandverhalten des Materials.

Moraci und Montanelli (1996) zeigen, dass bei einer Erhöhung der Temperatur von 20°C auf 40°C mit signifikant höheren Dehnungen bei gleichbleibendem Lastniveau zu rechnen ist.

2.5.2 Langzeitverhalten in statischen In-Soil-Untersuchungen

Bei einer Betrachtung des Langzeitverhaltens In-Soil ist zwischen dem Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Geokunststoffprobe im Boden und dem Auszugsverhalten zu unterscheiden.

Fannin und Hermann (1988) berichten von einer mit extrudierten Geogittern bestückten Böschung, in der über einen Zeitraum von über 900 Tagen Kräfte und Dehnungen in den Bewehrungsmaterialien gemessen werden. Dabei nahmen die Dehnungen um ca. 50 % zu, während nur eine marginale Kraftzunahme aufgezeichnet wurde. Bei Verwendung der vorliegenden isochronen Kraft-Dehnungskurven aus dem In-Air-Versuch (siehe Bild 2.29) konnte eine sehr gute Übereinstimmung zu den aufgenommenen Messwerten hergestellt werden. Die Autoren folgern daraus, dass sich die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen der verwendeten Geogitter in In-Air und In-Soil-Versuchen nur geringfügig voneinander unterscheiden.

Zu einer vergleichbaren Schlussfolgerung gelangen Min et al. (1995): Da das Kriechverhalten im Wesentlichen vom Bewehrungsmaterial abhängig ist, muss die zeitabhängige Dehnungsentwicklung bei gleicher Belastung In-Air und In-Soil vergleichbar sein. Die Autoren geben zu bedenken, dass es bei klassischen Auszugsversuchen sehr schnell zu einer Lastübertragung vom Bewehrungsmaterial in den Erdstoff im vorderen Krafteinleitungsbereich kommt, so dass gegenüber den aufgetragenen Kräften im Durchschnitt deutlich geringere Kräfte im Bewehrungsmaterial vorhanden sind. Dies könne zu einer Unterschätzung des Kriechverhaltens im Boden führen. Die Autoren untermauern ihre Aussagen mit einer Zusammenstellung von Kriechraten unter unterschiedlichen Auflasten und aus In-Air-Versuchen, die vergleichbare Ergebnisse aufweisen (Bild 2.30)

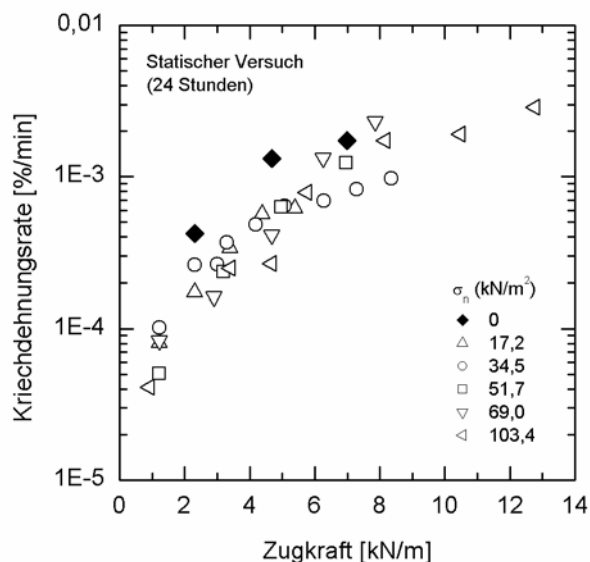


Bild 2.30: Kriechdehnungsrate eines Geogitters in Abhängigkeit von der Auflast bei statischen Versuchen, nach Min et al. (1995)

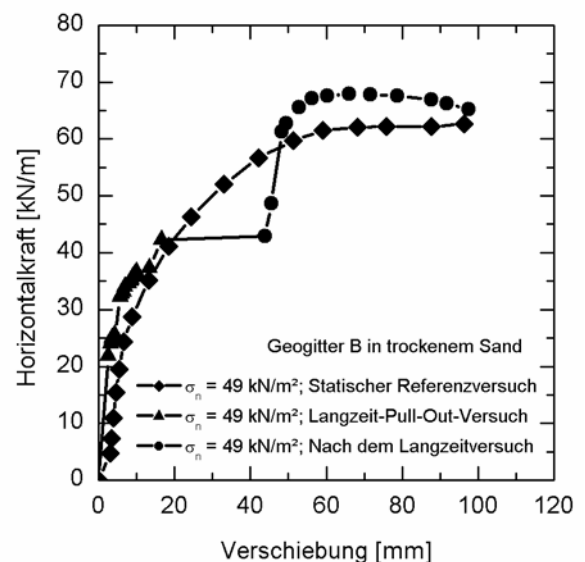


Bild 2.31: Auszugswiderstand eines Geogitters im Kurz- und Langzeitversuch im Vergleich, nach Collin und Berg (1993)

Andere Autoren (Müller-Rochholz und Recker, 1996; Kutara et al., 1988) berichten hingegen bei Langzeituntersuchungen von Geogittern im Boden von zum Teil deutlich geringeren Dehnungen als bei vergleichbaren Belastungen an der Luft. Inwiefern bei diesen Untersuchungen die beschriebene Kraftreduzierung durch Lastübertragung in den Boden berücksichtigt worden ist, kann nicht beurteilt werden.

Collin und Berg (1993) zeigen anhand von Langzeitauszugsversuchen mit einer Lastkonstanthaltung von 1000 h, dass die maximale Auszugskraft mit derjenigen im Kurzzeitversuch vergleichbar ist (Bild 2.31). Dabei nehmen die Dehnungen des Materials - besonders im höherbeanspruchten vorderen Bereich – während der Lastkonstanthaltung zu, so dass von einem Kriechverhalten im Boden ausgegangen werden kann. Das weggesteuerte Herausziehen im Anschluss an die Lastkonstanthaltung zeigt eine Kraftaufnahme bei deutlich geringeren Verformungen als im Kurzzeitvergleichsversuch. Die Autoren deuten dieses Phänomen als eine Verbesserung des Interaktionsverhaltens durch die Lastkonstanthaltung. Auch Min et al. (1995) zeigen ein vergleichbares Auszugsverhalten bei Kurzzeit- und Langzeitversuchen.

2.5.3 Langzeitverhalten in zyklischen In-Air-Untersuchungen

Moraci und Montanelli (1997) führen als zusätzliche Einflussparameter auf die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von Geokunststoffen unter zyklischer Belastung Lastniveau, Amplitude, Frequenz und Lastspielzahl an.

Müller-Rochholz (1998) hat Proben eines extrudierten Geogitters aus HDPE mit bis zu 10^7 Lastspielen zyklisch belastet und anschließend einem Kurzzeitzugversuch unterzogen. Dabei hat er eine leichte Zunahme der Festigkeit bei geringfügiger Abnahme der Bruchdehnung beobachtet. Der Autor bezeichnet den Effekt als „Hochtrainieren“: Die wechselnde Beanspruchung führt zu einer optimierten Orientierung und damit zur Festigkeitserhöhung.

Moraci und Montanelli (1997) weisen in Versuchen mit 10.000 Lastspielen an einem extrudierten HDPE-Geogitter und einem gewebten PET-Geogitter eine Zunahme der Dehnungen durch die Zyklik nach (Bild 2.32). Während die Frequenz von untergeordneter Bedeutung ist, steigen die Dehnungen mit wachsendem Lastniveau bzw. Amplitude signifikant an. Amplituden, die nicht von einer Ursprungsbelastung, sondern einem Unterlastniveau ausgehen, erzeugen dabei ebenfalls größere Dehnungen. Der Zusammenhang zwischen Zusatzdehnungen und Lastspielzahl kann weitestgehend als log-linear bezeichnet werden. Aus ihren Untersuchungsergebnissen konstruieren die Autoren Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für bestimmte Lastspielzahlen (Bild 2.33).

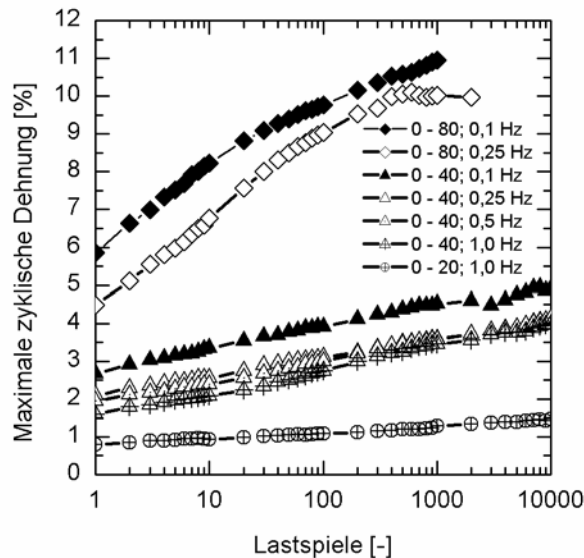


Bild 2.32: Maximale zyklische Dehnung in Abhängigkeit von Lastspielzahl, Frequenz und Lastniveau, nach Moraci und Montanelli (1997)

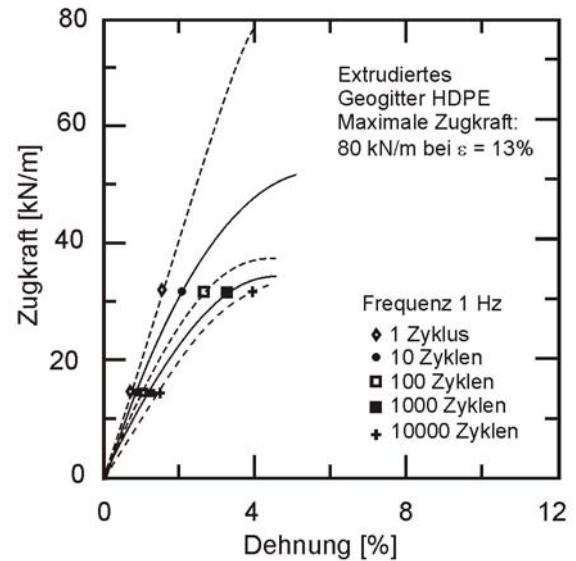


Bild 2.33: Isozyklische Kurven des maximalen zyklischen Lastniveaus in Abhängigkeit der maximalen Dehnung, nach Moraci und Montanelli (1997)

Ein Zusammenhang zwischen den Kriechdehnungen eines statischen Versuches und den Dehnungen aufgrund einer zyklischen Belastung wird von Min et al. (1995) hergestellt, indem die Ergebnisse zyklischer Versuche zwischen einer Unter- und einer Oberlast den Dehnungen dieser Oberlast im statischen Versuch zeitabhängig gegenübergestellt werden. Die zyklischen Versuche erzeugen dabei durchweg geringere Dehnungen, was von den Autoren auf die nicht über den gesamten Zeitraum wirkende Maximallast zurückgeführt wird (Bild 2.34).

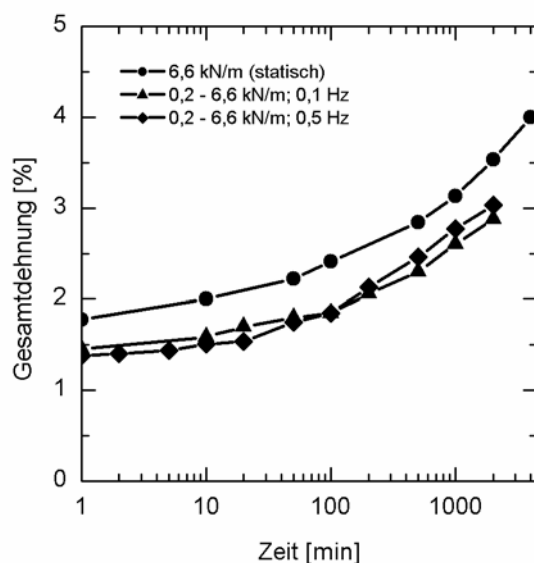


Bild 2.34: Dehnung eines Geogitters in statischen und vergleichbaren zyklischen Versuchen in Abhängigkeit der Zeit, nach Min et al. (1995)

2.5.4 Langzeitverhalten in zyklischen In-Soil-Untersuchungen

Min et al. (1995) zeigen in zyklischen In-Soil-Untersuchungen eine Zunahme der Dehnungen mit der Amplitude. Aufgrund der Lastübertragung von Kräften in den Boden sind die Dehnungen im Boden deutlich geringer als bei vergleichbaren In-Air-Versuchen. Gegenüber statischen In-Soil-Tests mit dem Oberlastniveau des zyklischen In-Soil-Versuches ist eine Abnahme der Dehnungen um etwa 20 % zu verzeichnen. Diese Tendenz ist mit derjenigen in den In-Air-Versuchen vergleichbar (Abschnitt 2.5.2).

2.6 Forschungsbedarf

Nach der Analyse der vorliegenden Literaturquellen ist eine nähere Untersuchung folgender Fragestellungen erforderlich:

- Erarbeitung einer zielführenden Versuchsanordnung zur Untersuchung der zyklischen Einwirkungskomponenten.
- Eine detaillierte Analyse des Verschiebungs- und Verformungsverhaltens der Bewehrungsmaterialien mit Aussagen zum Tragverhalten im Gebrauchslastbereich.
- Die Definition von Kernparametern für die zyklische Untersuchung sowie die Festlegung eines praxisorientierten Versuchsablaufes zur Extrahierung dieser Kennwerte.
- Die detaillierte Analyse des Interaktionsverhaltens unter zyklischer Beanspruchung und die Untersuchung des Einflusses von Kernparametern (wie dies bereits im weggesteuerten Bereich von vielen Autoren durchgeführt worden ist).
- Die Entwicklung einer Methodik zur Abschätzung der Kraftentwicklung und Lastabtragung im zyklischen Bereich.
- Die systematische Zusammenstellung und Auswertung der ermittelten Daten und die Erarbeitung eines Vorschlages zur gewinnbringenden Umsetzung extrahierter Erkenntnisse.

3 Grundlagen des eigenen Untersuchungsprogramms

3.1 Einleitung

Für die Untersuchung des Verbundverhaltens zwischen Erdstoff und Bewehrungsmaterial unter zyklischer Belastung ist der Auszugsversuch optimal geeignet, da kein anderer Versuchstyp eine adäquate wirklichkeitsnahe Beanspruchung des Probenmaterials gewährleistet. Es können Daten über das Verschiebungs-, Dehnungs- und Lastabtragungsverhalten der Probe ermittelt werden, wobei die Variation einer Vielzahl potenzieller Einflussparameter möglich ist.

Nach Analyse der aus der Literatur zusammengetragenen Erkenntnisse (Abschnitt 2.4.3) wurde ein Pull-Out-Versuchsstand entwickelt und gebaut, der sich optimal zur Durchführung statischer und zyklischer Auszugsversuche eignet. Der Versuchsstand mit seinen Komponenten wird in Abschnitt 3.2 eingehend beschrieben.

Dem Abschnitt 3.3 ist eine Übersicht der verwendeten Erdstoffe und Bewehrungsmaterialien mit allen relevanten Daten zu entnehmen.

Die grundlegende Konzeption der statischen und zyklischen Versuche, die auf einer Analyse der Beanspruchungssituation, der relevanten Einflussparameter und der Auswertung der Literaturkenntnisse in Abschnitt 2.4.3 basiert, ist in den Abschnitten 3.4 und 3.5 ausführlich dargestellt.

3.2 Entwicklung des Pull-Out-Versuchsstandes

3.2.1 Einführung

Der verwendete großmaßstäbliche Versuchsstand des Institutes für Geotechnik und Markscheidewesen der TU Clausthal ist speziell für die Problematik der zyklischen Belastung von Geokunststoffen im Erdstoffverbund entwickelt und konstruiert worden. Dabei wurden die aus der Literatur extrahierten Erkenntnisse, die Erfordernisse des Untersuchungsprogramms und die Angaben der DIN EN 13738 (Entwurf) bei der Entwicklung berücksichtigt, so dass mit dem Versuchsstand normgerechte statische und optimierte zyklische Auszugsversuche durchgeführt werden können.

Der Versuchsstand setzt sich aus dem Versuchskasten, der Einrieselanlage zum reproduzierbaren Einbau unterschiedlicher Dichten, den Belastungseinrichtungen für die vertikale und horizontale Achse sowie der Instrumentierung und einer Datenerfassungsanlage zusammen.

3.2.2 Pull-Out-Gerät

3.2.2.1 Übersicht

Die wesentlichen Komponenten des Versuchsstandes und ihre Anordnung sind der Systemskizze (Bild 3.1) und dem Übersichtsfoto (Bild 3.2) zu entnehmen.

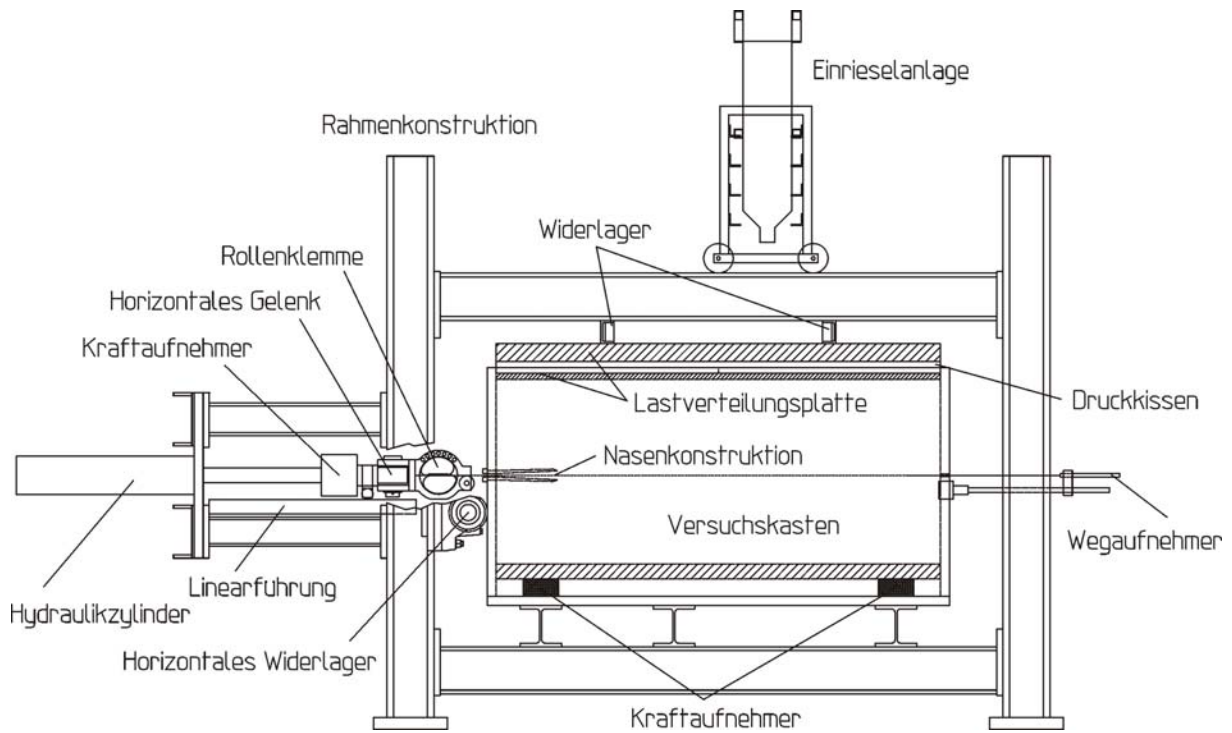


Bild 3.1: Systemskizze des für die Versuchsdurchführung verwendeten, großmaßstäblichen Versuchsstandes

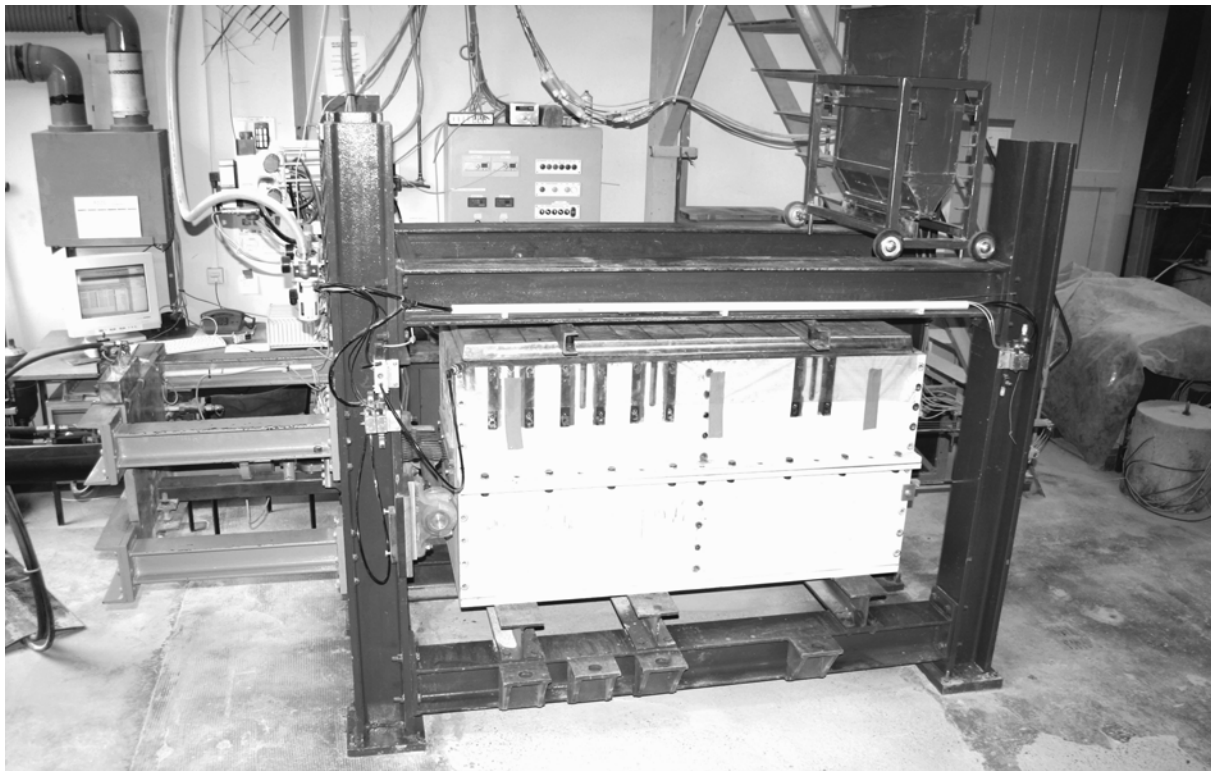


Bild 3.2: Ansicht des Versuchsstandes

3.2.2.2 Versuchskasten

Die Innenabmessungen des Versuchskastens werden in DIN EN 13738 (Entwurf) mit mindestens 1,50 m in der Länge, 0,60 m in der Breite und 0,30 m in der Höhe angegeben. Die Kastenhöhe muss bei Bedarf bis zum 6fachen der maximalen Korngröße des Bodens erweitert werden. Weiterhin muss ein Verhältnis von Länge zu Breite der belasteten Messprobe von mindestens 3 ermöglicht werden, und zur Verminderung von Randeffekten sollte die Messprobe an jeder Seite mindestens 100 mm von den Seitenwänden entfernt angeordnet werden.

Der Versuchskasten sollte den Einbau von Messproben mit einer wirklichkeitsnahen Einbindelänge ermöglichen. Nach Elias et al. (2001) sind die Bewehrungselemente hinter einer Bruchfläche mindestens mit einer Länge von 1,00 m in den Verankerungsbereich zu führen, so dass sich eine sinnvolle, eingebettete Probenlänge von mindestens einem Meter ergibt.

Nach Auswertungen des Abschnittes 2.4.3.2.6 kommt es ab einer bestimmten Einbindelänge bei Vergrößerung der Einbindelänge nicht mehr zu einer linearen Vergrößerung der maximalen Auszugskraft. Da dieser Effekt sehr stark von der Normalspannung abhängig ist, kann er bei der Dimensionierung der Abmessungen des Versuchskastens nicht adäquat berücksichtigt werden.

Gewählt werden Kastenabmessungen von 1,50 m in der Länge und 0,60 m in der Breite. Damit kann eine Regeleinbindelänge von 1,15 m zur Durchführung von Modellversuchen unter Berücksichtigung der oben dargestellten Randbedingungen verwendet werden. Die Auswertung in Abschnitt 2.4.3.2.5 zeigt, dass die maximale Auszugskraft aufgrund von Randeffekten deutlich von der Probenbreite abhängig ist. Ab einer Probenbreite von ca. 50 % der Kastenbreite nimmt jedoch bei den meisten Autoren der Einfluss durch Randeffekte ab, so dass im vorliegenden Fall mit einer Regelprobenbreite von 0,30 m gearbeitet wird. Damit werden auch die in DIN EN 13738 (Entwurf) geforderten Randabstände eingehalten. Um Querstrebeneffekte wirklichkeitsnah abbilden zu können, sollten innerhalb der Probenbreite mindestens drei Längsstreben eingebracht werden können.

Die Literaturstudie zeigt, dass die Kastenhöhe einen deutlichen Einfluss auf die maximale Auszugskraft aufweist, da bei geringen Abständen zu den starren oberen und unteren Widerlagern Randeffekte stärker zum Tragen kommen (Farrag et al., 1993). Im vorliegenden Fall wird mit einer Einbauhöhe des Bodens von 0,62 m gearbeitet, so dass im Bereich von Sanden Randeffekte weitgehend ausgeschlossen werden können.

Zur weiteren Reduzierung von Randeffekten sind Vorversuche durchgeführt worden, in denen die Seitenwände mit unterschiedlichen Materialien ausgekleidet und die Reibungsverluste einer aufgetragenen Auflast am Kastenboden überprüft worden sind. Dabei erwies sich ein Sandwich-System als sehr geeignet, bei dem zunächst eine Vaselineschicht auf die Seitenwände aufgetragen und anschließend eine glatte Folie aufgebracht wird (Bild 3.3, linkes Bild). Vergleichbare Erfahrungen sind von Ochiai et al. (1992) berichtet worden.

Im vorderen Bereich ist auf einer Höhe von 0,30 m oberhalb der Bodenplatte ein Schlitz in der Frontwand angeordnet, der das Herausziehen von Proben mit einer Dicke von bis zu einem Zentimeter und einer Breite von bis zu 0,40 m erlaubt. Auf gleicher Höhe befindet sich an der Rückwand ein Schlitz zur Durchführung der Stangenextensometer.

Aufgrund der in Abschnitt 2.4.3.2.9 ausgewerteten Erkenntnisse wird eine Nasenkonstruktion vom Frontschlitz in das Kasteninnere aus 10 mm starkem Stahl mit einer Länge von 0,20 m gewählt.

Die 50 mm starke, biegesteife Bodenplatte lagert auf Kraftaufnehmern auf, die wiederum auf der Widerlagerkonstruktion aufliegen. Die Wände des Versuchskastens sind aus 30 mm starkem Stahlblech gefertigt, so dass eine Beeinflussung der Ergebnisse durch Verformungen der Kastenkonstruktion im vorgesehenen Auflastbereich weitgehend ausgeschlossen werden kann.

Durch Einsetzen einer Mittelplatte kann der Versuchskasten zur Durchführung von Indexversuchen auf die Maße von 0,75 m x 0,60 m x 0,60 m (L x B x H) reduziert werden (Abschnitt 3.4). Die Position der Messbrücke kann an diese Verhältnisse angepasst werden, so dass Indexversuche, bei denen nicht primär die Erfassung von Materialdehnungen und Lastabtragungen benötigt wird, mit deutlich reduziertem Aufwand durchgeführt werden können.

3.2.2.3 Einrieselanlage

Aufgrund des in Abschnitt 2.4.3.2.3 zusammengefassten erheblichen Einflusses der Einbaudichte auf die maximale Auszugskraft kommt dem kontrollierten, reproduzierbaren Einbau des Erdstoffes eine wesentliche Bedeutung bei der Ermittlung exakter Versuchsergebnisse zu.

Böckmann (1991), Lehnert (1983) und Zaeske (2001) führten umfangreiche Untersuchungen zum reproduzierbaren Einbau von nicht-bindigen Erdstoffen durch. Im Ergebnis stellten sich nur Riesel- oder Einregnungsverfahren, bei denen der Erdstoff durch ein Lochblech aus einer bestimmten Höhe eingebracht wird, als geeignet für einen kontrollierten Dichteeinbau heraus. Dabei steigt die erzielbare Dichte im Wesentlichen mit der Einregnungshöhe und mit kleineren Lochdurchmessern an.

Aus diesem Grund wird für den kontrollierten Einbau trockener nicht-bindiger Bodenmaterialien in den Versuchskasten eine Einrieselanlage verwendet (Bild 3.3). Sie besteht aus einem ca. 0,064 m³ fassenden Silo, aus dem über die Gesamtbreite des Versuchskastens Erdstoff über verschiedene Lochblenden eingebracht wird. Das Silo befindet sich in einem verfahrbaren Metallgestell und kann somit über die Gesamtlänge des Versuchskastens bewegt werden. Eine Höhenverstellung ist in acht Positionen in Abständen von 10 cm möglich, so dass die Gesamtfüllmenge des Versuchskastens in sechs Lagen á 10 cm eingebaut wird. Die maximal erreichbare Fallhöhe beträgt dabei 0,60 m.



Bild 3.3: Einrieselanlage mit verschiedenen Lochblenden und -schlitzen zum Einbau unterschiedlicher Lagerungsdichten

In umfangreichen Vorstudien mit einem Sandmaterial wurden die erzielbaren Lagerungsdichten in Abhängigkeit verschiedener Lochblenden und Einrieselhöhen untersucht (Bild 3.4). Es können Einbaudichten von 1,70 bis 1,80 g/cm³ erzielt werden, wobei die Lagerungsdichten im oberen Bereich als realitätsnäher zu betrachten sind. Das Kiesmaterial wird über Lochschlitze in den Versuchskasten eingerieselt (Bild 3.3, rechts oben).

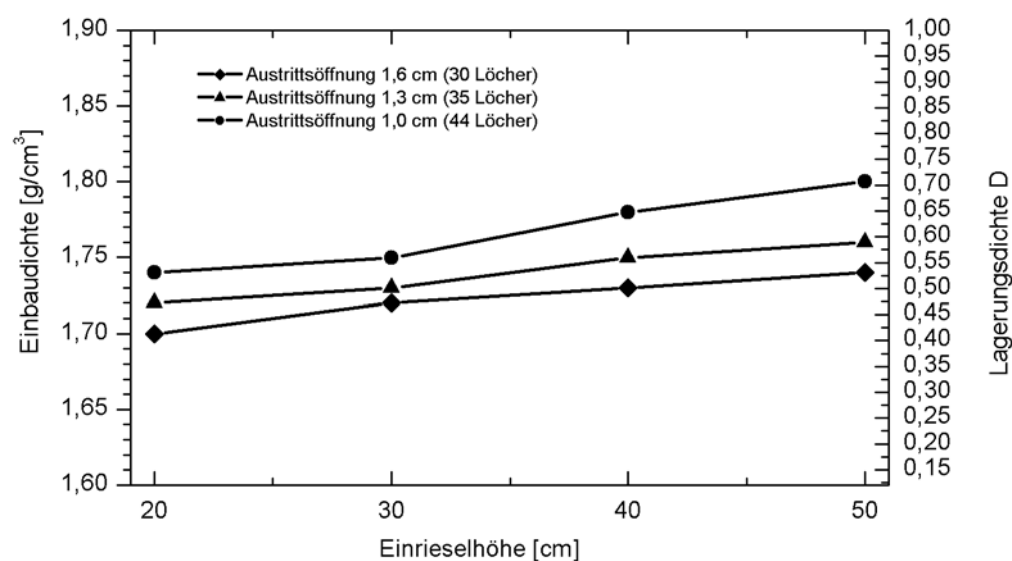


Bild 3.4: Erzielbare Einbaudichten bei Sand 0/4 in Abhängigkeit von Lochblende und Einrieselhöhe

3.2.2.4 Belastungseinrichtungen

Eine gleichmäßige Vertikalspannungsaufbringung erfolgt durch zwei pneumatische Belastungskissen der Firma Manfred Vetter mit den Abmessungen 0,745 m x 0,595 m (Bild 3.5), die sich gegen eine 60 mm starke Stahlplatte abstützen, welche mit dem Widerlagerrahmen des Versuchsstandes verbunden ist. Zu Lastverteilungszwecken wird die Spannung auf den Erdstoff über eine 20 mm starke Holzplatte übertragen. Die aufgebrachte Vertikalspannung wird über den aufgebrachten Luftdruck mit einer Genauigkeit von einem kN/m^2 bis zu einer Maximalspannung von 300 kN/m^2 geregelt. Zur Durchführung von Indexversuchen wird lediglich das vordere Kissen belastet.

Die konstante Vertikalspannung der Druckkissen kann durch vertikale Zyklen überlagert werden. Diese werden durch vier pneumatische Muskeln der Firma Festo erzeugt, die eine spezielle, auf dem Erdstoff aufliegende Widerlagerplatte mit dem unteren Rahmen des Versuchsstandes verbinden. Durch Zugabe von Druckluft ziehen sich die pneumatischen Muskeln zusammen und verringern damit die durch die Luftkissen aufgebrachte, konstante Vertikalspannung.



Bild 3.5: Pneumatische Druckkissen zur Aufbringung der Vertikalspannung



Bild 3.6: Rollenklemme im Detail

In der horizontalen Achse wird die Kraft über ein Hydrauliksystem aufgebracht. Für den statischen Versuchsablauf erfolgt eine weggesteuerte Verfahrung des Hydraulikzylinders, wobei nach Auswertung von Abschnitt 2.4.3.2.8 Geschwindigkeiten zwischen $0,5 \text{ mm/min}$ und 20 mm/min eingestellt werden können. Im weggesteuerten Betriebsmodus ist die Aufbringung maximaler Horizontallasten von bis zu 400 kN/m möglich.

Horizontale Zyklen des Hydrauliksystems werden über ein Be- und ein Entlastungsventil gesteuert, so dass eine Kraftaufbringung zwischen zwei gewählten Drücken erfolgt. Damit ist die Überlagerung einer horizontalen Grundlast mit einer zyklischen Komponente möglich. Die Frequenz der zyklischen Lastaufbringung kann zwischen $0,01$ und 5 Hz eingestellt werden.

Die Bewehrungsprobe wird mit dem Hydrauliksystem über eine Klemme verbunden. Die Klemmenkonstruktion ist entsprechend DIN EN 13738 (Entwurf) in horizontaler Richtung drehbar gelagert, um die Horizontalkraft gleichmäßig aufzubringen. Die Geokunststoffproben werden in einer Rollenklemme (Bild 3.6) aus Aluminium eingespannt, die aus zwei miteinander verbundenen Halbschalen besteht, die frei drehbar in einer Halterung eingebaut sind. Durch diese Konstruktion ist eine gleichmäßige Krafteinleitung über die gesamte Breite der Probe gewährleistet. Die Stahlproben werden in einer Flachklemme aus zwei miteinander verschraubten Stahlbacken eingespannt.

3.2.3 Instrumentierung des Versuchsstandes

Die auf das Probenmaterial aufgebrachte Kraft in horizontaler Achse wird über einen Kraftaufnehmer der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik mit einer Nennkraft von 100 kN erfasst. Er ist zwischen dem Hydraulikzylinder und der Klemmenkonstruktion angeordnet. Zur Vermeidung von Querkrafteinflüssen auf die Kraftmessung ist die Klemmeinrichtung auf einer horizontalen Linearführung aufgelagert.

Unterhalb der Bodenplatte des Versuchskastens sind drei Kraftaufnehmer der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik mit einer Nennkraft von jeweils 50 kN dreiecksförmig angeordnet. Sie dienen der Ermittlung des am Boden ankommenden Auflastanteils. Der in den Belastungskissen aufgebrachte Druck wird über einen Druckaufnehmer der Firma STS Sensoren aufgezeichnet. Durch die Ermittlung des aufgebrachten Kissendrucks und der am Boden des Versuchskastens ankommenden Kraft ist eine rechnerische Ermittlung von Verlusten durch Wandreibung, die Nasenkonstruktion oder andere Faktoren möglich. Des Weiteren kann die Normalspannung in der Auszugsfuge abgeschätzt werden.

Die Verschiebungen an der Klemmenkonstruktion werden durch einen induktiven Wegaufnehmer der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik mit einem Nennmessweg von 300 mm aufgezeichnet, während Verschiebungen des eingebetteten Probenmaterials über induktive Wegaufnehmer mit Nennmesswegen von 200 mm erfasst werden.

Die Wegaufnehmer sind hinter dem Versuchskasten auf einer Messbrücke in Höhe der Auszugsfuge angeordnet und mit Stangenextensometern mit einem Durchmesser von 2,2 mm in Hüllrohren zur Reibungsverminderung mit den jeweiligen Messstellen im eingebetteten Probenmaterial verbunden (Bild 3.7). Diese Konstruktion erwies sich in Vorversuchen als gut geeignet zur Übertragung statischer und zyklischer Verschiebungen. Die Messstellen bestehen aus Metallplättchen, die an den Knoten der Bewehrungsmaterialien befestigt werden. Die genaue Anordnung ist den Abschnitten 3.3.3 und 3.3.4 zu entnehmen. Die Position der ersten Messstelle befindet sich zu Vergleichszwecken immer 10 cm hinter der Nasenkonstruktion.

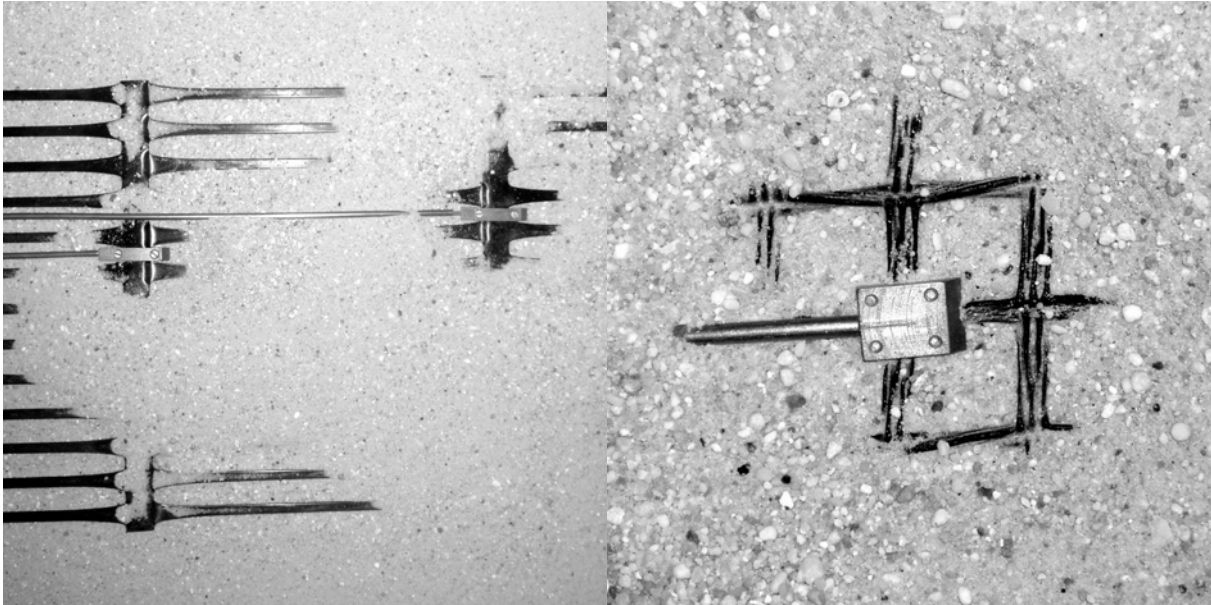


Bild 3.7: Befestigung der Stangenextensometer an der Geogitterprobe

Während der Modellversuche mit Kies wurden die Aufgleitungen der Belastungskonstruktion mit mechanischen Messuhren überprüft.

3.2.4 Datenerfassung

Die Datenerfassung erfolgt über das Messverstärkersystem MGCplus und das Softwarepaket Catman der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik.

In einer Standardversuchsdurchführung werden die Horizontalkraft, die Kraft an drei Messstellen unterhalb des Versuchskastenbodens, der Kissendruck, die Verschiebung der Klemmenkonstruktion sowie die Verschiebung an bis zu sechs Messstellen im eingebetteten Bereich aufgezeichnet.

Für statische Versuche beträgt die Aufzeichnungsfrequenz für alle Daten ein Hertz; für zyklische Versuche wird in der Regel mit einer Aufzeichnungsfrequenz gearbeitet, die der fünffachen Belastungsfrequenz entspricht. Dieser Wert stellt einen guten Kompromiss zwischen der Größe der anfallenden Datenmenge und der Genauigkeit der Messdaten dar. Näherungsweise lassen sich bei dieser Aufzeichnungsfrequenz Auswertungen einzelner Zyklen vornehmen.

Zur weiteren Auswertung werden aus der aufgezeichneten Datenmenge jeweils die Messwerte zum Zeitpunkt des Amplitudenmaximums extrahiert und in einer separaten Datenbasis gespeichert. Aufgrund der im Regelfall sehr kleinen Differenzen zwischen den Verschiebungswerten aufeinanderfolgender Zyklen kommt es zu Unstetigkeiten, die über eine Mittelwertbildung der Verschiebungsdaten angepasst werden (Abschnitt 5.2.1).

3.3 Versuchsmaterialien

3.3.1 Einführung

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die in den Versuchen verwendeten Erdstoffe und Bewehrungsmaterialien gegeben. Die angegebenen Daten und Parameter stammen aus eigenen Untersuchungen bzw. den Angaben der jeweiligen Hersteller.

Da die Kornverteilung und der mittlere Korndurchmesser einen signifikanten Einfluss auf die Lastabtragung von Geokunststoffen besitzen (Abschnitt 2.4.3.2.4), wird ein Mittel- bis Grob-sand sowie ein Mittelkies untersucht.

Im Bereich der Bewehrungselemente wird das Hauptaugenmerk auf die dehnbaren Geokunststoffe gelegt. Als wesentliches Produkt für die Funktion „Bewehren“ gilt hierbei das Geogitter, so dass von dieser Produktkategorie drei unterschiedliche Produkte mit unterschiedlichen Herstellungsprozessen untersucht werden. Zu Vergleichszwecken wird aus dem Bereich wenig dehnbarer Materialien ein Stahlgitter sowie ein glattes Stahlblech herangezogen.

3.3.2 Erdstoffe

Zur Durchführung der Index- und Modellversuche ist ein enggestufter Mittel-Quarzsand mit einer Körnung von 0 bis 4 mm und ein Kiesgemisch mit einer Körnung von 2 bis 12 mm aus einem Kieswerk bei Uhri (Niedersachsen) verwendet worden.

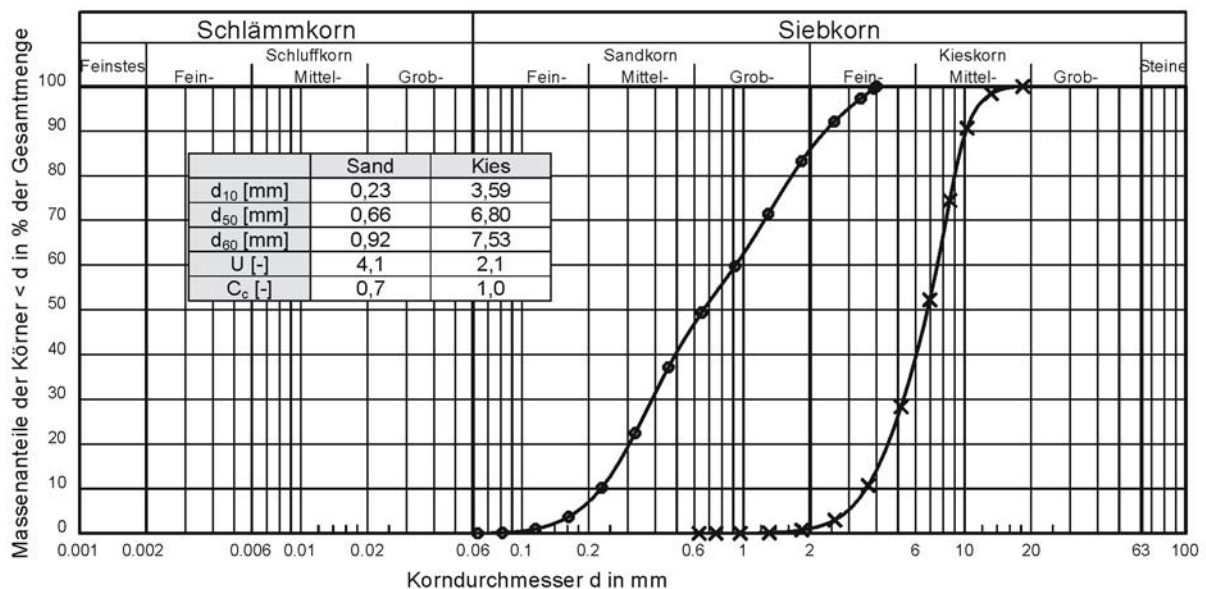


Bild 3.8: Korngrößenverteilungen der verwendeten Erdstoffe

Die Siebanalysen vor und nach Durchführung der Versuchsreihen ergaben vergleichbare Werte. Eine Veränderung der Kornverteilung durch die Versuchsdurchführung kann damit ausgeschlossen werden.

Zur Ermittlung der bodenmechanischen Kenngrößen der Erdstoffe wurde eine umfangreiche Versuchsreihe der üblichen Laborversuche durchgeführt. Einige Ergebnisse sind für beide Erdstoffe in der Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Bodenmechanische Kenngrößen des trockenen Erdstoffes

	Sand 0/4	Kies 2/12
Dichteste Lagerung	1,90 g/cm ³	1,76 g/cm ³
Lockerste Lagerung	1,56 g/cm ³	1,53 g/cm ³
Korndichte	2,65 g/cm ³	2,65 g/cm ³
Einbaudichte	1,80 g/cm ³	1,61 g/cm ³
Lagerungsdichte D	0,71	0,33
Reibungswinkel φ_k	43°	36°
Kohäsion c_k	1,3 kN/m ²	7 kN/m ²

Die Scherparameter des Sandes sind an einem Schergerät mit einer kreisförmigen Scherfläche mit einem Durchmesser von 71,4 mm ermittelt worden.

Zur Ermittlung der Scherfestigkeit des Kiesel kam ein Großrahmenschergerät mit Rahmenabmessungen von 300 x 300 mm mit vertikal verschieblicher oberer Rahmenhälfte zum Einsatz.

Die Einbaudichte, die Vorschubgeschwindigkeit von 2 mm/min und der Auflastbereich von 20 bis 80 kN/m² wurden aus Vergleichbarkeitsgründen entsprechend der Größen im Auszugsversuch gewählt.

3.3.3 Geokunststoffe

Bei Geokunststoffen handelt es sich um polymere Materialien mit einem visko-elastischen Verhalten. Das Last-Verformungsverhalten wird somit von der Temperatur, der Dehnung und der Dehnungsrate beeinflusst. Verbreitete Polymere für die Herstellung von Geokunststoffen sind Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyester (PET/PES) und Polyamid (PA).

Im vorgestellten Versuchsprogramm sind drei Geogitter unterschiedlicher Herstellungsverfahren mit z.T. variierenden Ausgangsrohstoffen verwendet worden. Es handelt sich um uniaxiale Produkte mit einer Hauptzugrichtung (Produktionsrichtung) und einer Querrichtung. Die Regelpositionen der Stangenextensometer ist in den folgenden Übersichten jeweils durch schwarze Punkte markiert.

Das verwendete gewebte Geogitter (Geogitter G1) besteht aus sich rechtwinklig kreuzenden Fadensystemen (Kette und Schuss) synthetischer Garne aus Polyester. Nach der Herstellung wird das Material mit einer Polymer-Schutzschicht versehen. Herstellungsbedingt ist das gewebte Geogitter flexibel, besitzt bei Belastung eine hohe Konstruktionsdehnung aufgrund der Faserausrichtung und zeichnet sich durch Knoten mit geringer Formstabilität aus.

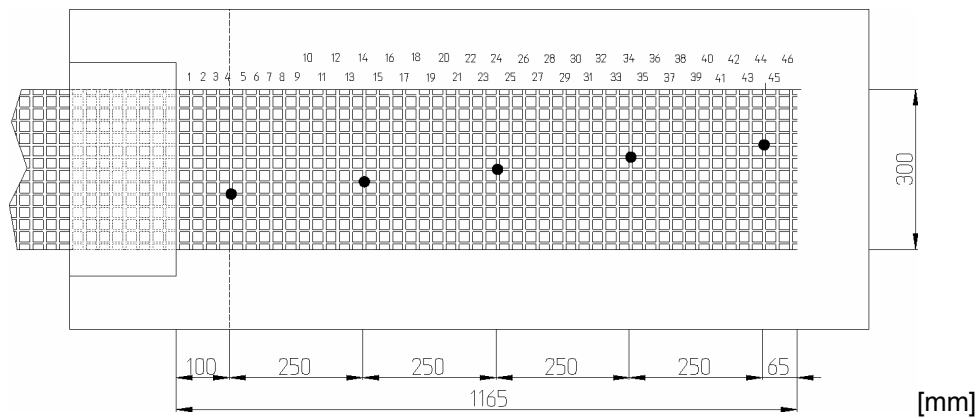


Bild 3.9: Geometriedaten des Geogitters G1 in Standardversuchen

Das untersuchte extrudierte Geogitter (Geogitter G2) wird aus einer PEHD-Kunststoffbahn produziert. Das Endprodukt wird durch Lochung der Kunststoffbahn und anschließende Streckung in Längsrichtung erzeugt. Da die Polymere bei diesem Prozess bereits ausgerichtet werden, besitzt das Material eine geringe Konstruktionsdehnung. Die unverschieblichen Knoten führen zu einem steifen Gesamtverhalten des Produktes.

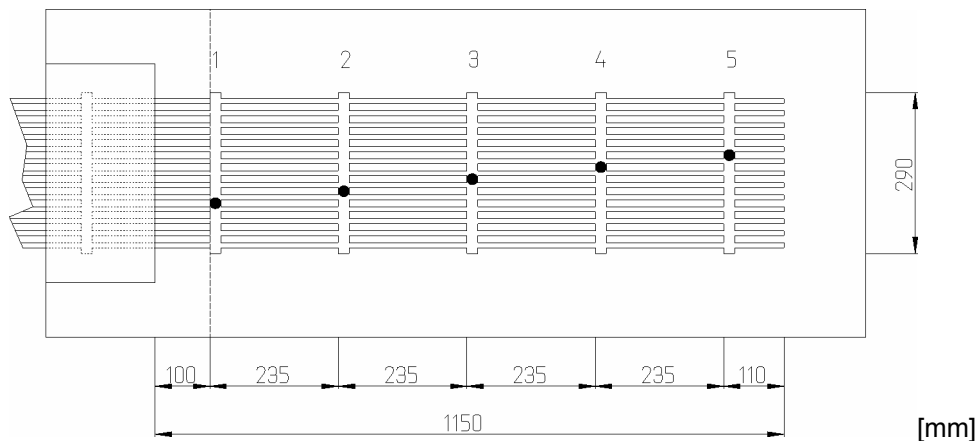


Bild 3.10: Geometriedaten des Geogitters G2 in Standardversuchen

Als drittes Geokunststoffmaterial wird ein Geogitter aus dem Bereich der gelegten Geogitter verwendet (Geogitter G3). Bei der Herstellung werden ummantelte Bändchen oder stabförmige Elemente durch Schweißung oder Klebung an den Knoten miteinander verbunden. Dies führt zu verschiebefesten, aber wenig torsionssteifen Knotenverbindungen. Das untersuchte Produkt wird in einem Reibklebverfahren aus Polyesterbändchen hergestellt. Weitere untersuchte Geometrievarianten des Geogitters G3 sind dem Anhang C.1 zu entnehmen.

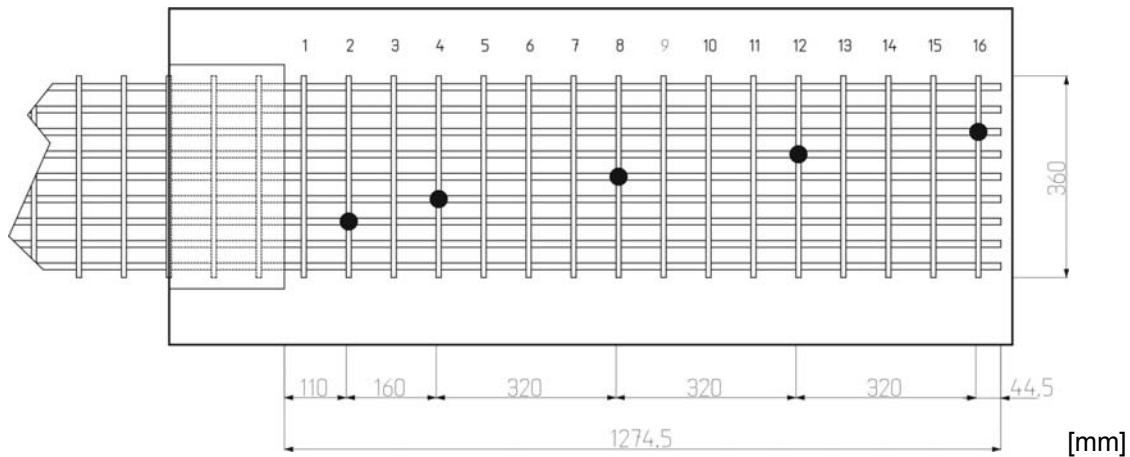


Bild 3.11: Geometriedaten des Geogitters G3 mit einem Querstrebenanteil von 100 %

Tabelle 3.2: Zusammenstellung der Eigenschaften der verwendeten Geogitter

Eigenschaften	Einheit	Geogitter G1 (gewebt)	Geogitter G2 (extrudiert)	Geogitter G3 (gelegt)
Öffnungsweite in Produktionsrichtung	mm	20	219	71
Abstand der Querstreben	mm	26	235	80
Öffnungsweite in Querrichtung	mm	20	16	28
Abstand der Längsstreben	mm	24	32	40
Dicke der Querstreben	mm	1,3 (gem. 0,85 – 1,2)	5,7	1,3
Zugfestigkeit in Produktionsrichtung bei 2 % Dehnung	kN/m	20	38	42
Zugfestigkeit in Produktionsrichtung bei 5 % Dehnung	kN/m	36	75,5	72
Höchstzugkraft in Produktionsrichtung	kN/m	110	136	120
Bruchdehnung	%	12,5	11,5	8
Dehnsteifigkeit bei 2 % Dehnung	kN/m	1000	1900	2100
Dehnsteifigkeit bei 5 % Dehnung	kN/m	720	1510	1440
Rohstoff	--	Polyester (PET)	Polyethylen hoher Dichte (PEHD)	Polyester, transparent (PET)

Angaben zur Geometrie und Lage der Verschiebungsmessstellen im eingebetteten Bereich sind für die Modellversuche den jeweiligen produktspezifischen Prinzipskizzen zu entnehmen. Bei den Indexversuchen ist mit einer Einbindelänge von 0,51 m (Geogitter G1) bzw.

0,49 m (Geogitter G2) gearbeitet worden. Weiterführende Geometriedaten sowie Details zum Spannungs-Dehnungsverhalten sind der Tabelle 3.2 zu entnehmen.

3.3.4 Stahlgitter

Zu Vergleichszwecken ist eine Versuchsreihe mit einem wenig dehnbaren Gittermaterial durchgeführt worden. Dazu wurde eine Bewehrungsmatte aus miteinander verschweißten, geriffelten Stahlstäben (Durchmesser 5 mm) verwendet (Bild 3.12).

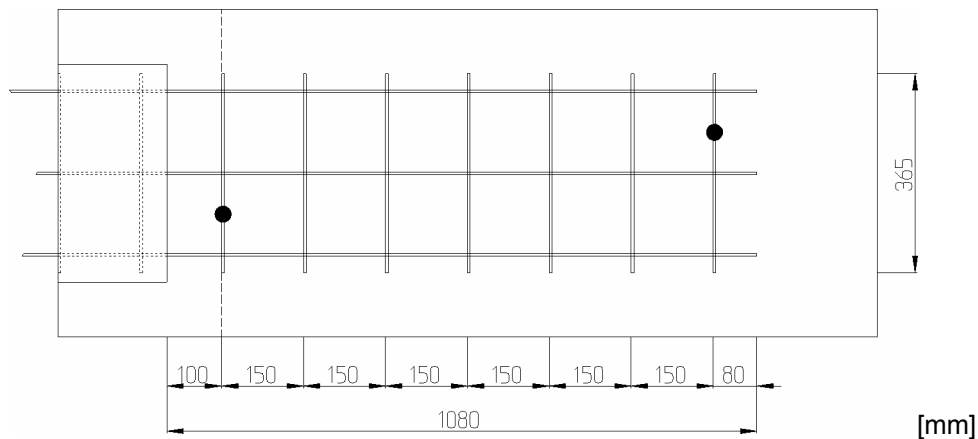


Bild 3.12: Geometriedaten des Stahlgitters

3.3.5 Stahlblech

Unterschiede im Lastabtragungsverhalten bei einem reinen Reibungsmaterial werden bei Versuchen mit einem glatten Stahlblech ermittelt (Bild 3.13). Die Blechstärke beträgt 0,7 mm.

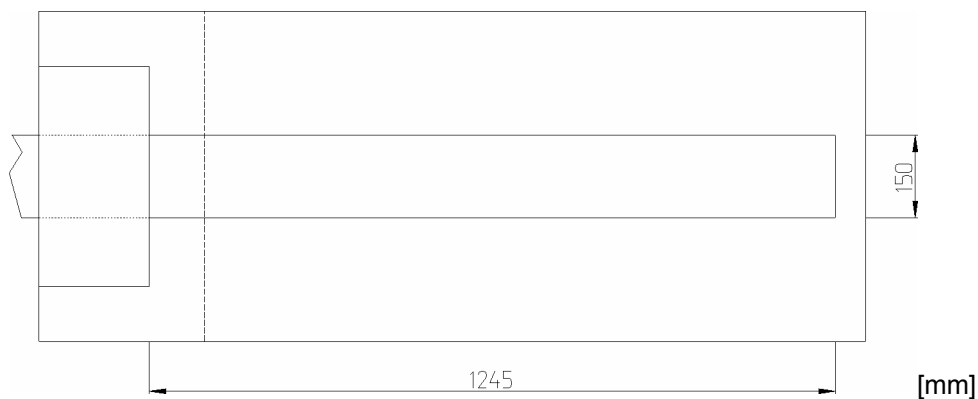


Bild 3.13: Geometriedaten des Stahlbleches

3.4 Versuchskonzeption für statische Index- und Modellversuche

3.4.1 Einführung

Statische Index- und Modellversuche werden zur Prüfung des Versuchsstandes, zur Übertragung aus der Literaturrecherche bekannter Parameter auf die eigenen Versuchsmaterialien und als Referenzversuche für das zyklische Versuchsprogramm benötigt. Die Indexversuche – Versuche am Versuchskasten mit halber Länge und damit auch mit reduzierter Ein-

bindelänge - werden zur Untersuchung des Einflusses der Einbaudichte und der Auflast herangezogen. Nach Alfaro et al. (1995) liefern Indexversuche mit verkürzten Einbindelängen für die Auswertung von Horizontalkräften verwertbare Ergebnisse, während Verschiebungs- und Dehnungsanalysen unter Verwendung von Modellversuchen (Versuche im kompletten Versuchskasten) durchgeführt werden sollten.

Dabei werden bei der Durchführung die Erkenntnisse aus der Literaturstudie und die Anforderungen der DIN EN 13738 (Entwurf) berücksichtigt.

3.4.2 Beanspruchung

Im Bereich statischer Index- und Modellversuche ist lediglich die Festlegung der aufgetragenen Vertikalspannung möglich. Ziel dieser Festlegung ist es, ein realistisches Beanspruchungsniveau für die Versuchsdurchführung festzulegen. In statischen Bemessungssituationen bedürfen die oberen Bewehrungslagen einer bewehrten Stützkonstruktion besonderer Beachtung, da die Verankerungslängen im passiven Bereich aufgrund der Geometrie des Bruchmechanismus im oberen Bereich kurz sind und die Auflast aus Bodeneigengewicht, die den Auszugswiderstand vergrößert, gering ist. Nach den Analysen des Abschnittes 2.3.1 wirken sich Verkehrsbelastungen lediglich bis in eine Tiefe von zwei bis drei Metern signifikant aus. Weiterhin sollten die Vertikalspannungen in einer Größenordnung gewählt werden, die es erlaubt, im Versuch ein Herausziehen des Probenmaterials und kein Zugversagen zu erzielen.

Aus diesen Gründen wird ein vertikaler Auflastbereich von 15 bis 60 kN/m² für die statischen Modellversuche gewählt.

3.4.3 Einflussparameter zur Variation

Aus der Analyse der Literaturdaten in Abschnitt 2.4.3.2 sind als wesentliche Einflussparameter die Auflast, die Einbaudichte, die Bodenart und die Geokunststoffgeometrie extrahiert worden. Diese Parameter werden daher auch für den Aufbau einer Datenbasis statischer Versuche variiert. Die Einbaudichte wird lediglich im Rahmen einer Indexstudie untersucht, da Referenzversuche nur für realitätsnahe hohe Einbaudichten erforderlich sind.

Aufgrund des signifikanten Einflusses des Erdstoffes und seiner Kornverteilung sowie des Geogitters (Abschnitt 2.4.3.2.4) sind zwei nicht-bindige Erdstoffe mit stark variierenden Kornverteilungen und drei Geogitter unterschiedlicher Geometrie und Herstellungsart für die Modellversuche ausgewählt worden. Dadurch sollen Aussagen über den Einfluss des Interlock-Effektes, des Erdwiderstandes (Koerner, 1999; Juran et al., 1988) sowie des Lastabtragungsverhaltens bestimmter Materialkombinationen getroffen werden können. Durch die Variation des Querstrebenanteils bei einem gelegten Geogitter werden zusätzliche Informationen zu diesem Themenkomplex gewonnen. Zu Vergleichszwecken wird ein wenig dehnbares Stahlgitter sowie als reines Reibungsmaterial ein glattes Stahlblech herangezogen.

Aufgrund der beim zyklischen Versuch zusätzlich zu variierenden Einflussparameter „Oberlastniveau“ und „Amplitude“ ist zur Vereinfachung eine Normalisierung der zyklischen Daten auf die maximale Auszugskraft F_p notwendig. Um eine Aussage über das Tragverhalten der exakten Parameterkombination im zyklischen Modellversuch treffen zu können, sollen in statischen Modellversuchen die Einflüsse einer Variation von Auflast und Einbindelänge auf die maximale Auszugskraft F_p untersucht werden. Mit diesen Erkenntnissen wird eine Erweiterung der Aussagekraft der zyklischen Modellversuchsreihe erreicht.

3.4.4 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung ist in Anlehnung an DIN EN 13738 (Entwurf) gewählt und wird im Folgenden lediglich in kompakter Form skizziert.

Zunächst wird eine reibungsmindernde Schicht aus Vaseline und Folie auf die Wände des Versuchskastens aufgebracht. Im Anschluss erfolgt das schichtweise Einrieseln des Erdstoffes aus einer definierten Höhe bis zum Erreichen der Auszugsfuge. Die zweiteilige Nasenkonstruktion wird an der Frontwand befestigt und anschließend die mit Verschiebungsmessstellen vorbereitete Probe vorsichtig durch den vorderen Schlitz eingeführt und mit der Klemmenkonstruktion verbunden. Die Stangenextensometer werden an den Verschiebungsmessstellen befestigt und durch den Schlitz in der hinteren Wand mit dem Wegmesssystem verbunden. Die obere Hälfte des Versuchskastens wird eingerieselt und mit der Belastungskonstruktion aus Lastverteilungsplatte und Luftkissen versehen.

Der Versuchablauf beginnt mit dem Aufbringen der Vertikalspannung über das Luftkissen. Die Bewehrungsprobe wird dann mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min mit dem Hydrauliksystem aus dem Versuchskasten herausgezogen. Nach ASTM D 6706 ist die Belastung fortzusetzen, bis ein Zugbruch des Bewehrungsmaterials eintritt, ein Herausziehen zu verzeichnen ist oder eine vorbestimmte Verschiebung erreicht ist. Ein Herausziehen wird als Zustand definiert, bei dem alle Verschiebungsmessstellen bei konstanter oder abfallender Horizontalkraft eine gleiche Verschiebungsrate aufweisen. Bei Verwendung des Kiesmaterials ist die Beschränkung der vertikalen Verformungsmöglichkeit durch die Widerlagerkonstruktion aufgrund der großen Dilatanzeffekte nicht zielführend, so dass mit Totlasten aus Blei gearbeitet wird.

Im Anschluss an den Versuch wird der Erdstoff mit einer Saugvorrichtung entfernt und das Probenmaterial auf sichtbare Beschädigungen untersucht.

Der Einbauvorgang mit Instrumentierung und die Versuchsdurchführung mit Ausbau der Materialien beanspruchen bei Regelversuchen jeweils einen Arbeitstag.

3.4.5 Versuchsprogramm

Es werden insgesamt 24 Indexversuche an einem gewebten und einem gestreckten Geogitter sowie einem glatten Stahlblech durchgeführt. Hierzu wird der Versuchskasten in der re-

duzierten Größe von 0,75 m x 0,60 m x 0,60 m (L x B x H) verwendet. Die Untersuchungen der Geogitter werden jeweils mit drei verschiedenen, diejenigen des Stahlbleches mit vier verschiedenen Auflasten durchgeführt. Als Erdstoff wird ausschließlich der Sand 0/4 in einer Lagerungsdichte von 1,70, 1,75 und 1,80 g/cm³ eingebaut. Detaillierte Eingangsparameter der einzelnen Versuche sind dem Anhang C.2 zu entnehmen.

Diese Versuchsreihe der maßgebenden Einflussparameter entsprechend Abschnitt 2.4.3 dient der Prüfung des Versuchsstandes sowie der Verifikation einer korrekten Versuchsdurchführung durch einen Vergleich der Tendenzen mit den Ergebnissen verschiedener Literaturquellen.

Das Versuchsprogramm sieht insgesamt 32 Modellversuche mit gewebtem, gestrecktem und gelegtem Geogitter sowie einem Stahlblech und einem Stahlgitter in Sand 0/4 und Kies 2/12 vor. Dazu wird der großmaßstäbliche Versuchskasten verwendet. Im Sand und im Kies werden Referenzversuche durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit von Versuchsergebnissen absichern zu können.

In dieser Versuchsreihe werden Referenzversuche mit gleicher Auflastsituation und Probengeometrie wie bei der zyklischen Versuchsreihe durchgeführt. Entsprechende Versuche sind in der Versuchsübersicht im Anhang C.3 grau unterlegt. Mit den Variationen der Auflast und der Einbindelänge wird eine Verallgemeinerung der zyklischen Versuchsergebnisse angestrebt. Über eine Veränderung des Querstrebenanteils des gelegten Geogitters sollen Informationen über die Lastabtragungskomponenten ermittelt werden, die mit den zyklischen Daten verglichen werden.

3.5 Versuchskonzeption für zyklische Modellversuche

3.5.1 Einführung

Im Rahmen des zyklischen Untersuchungsprogramms werden im Wesentlichen die Einflüsse der Parameter Belastungsniveau (Größenordnung der Oberlast), Amplitude (Differenz zwischen Ober- und Unterlast), Frequenz und Lastspielzahl ermittelt. Zu Verifikationszwecken werden zusätzlich bestimmte statische Einflussparameter wie der Erdstoff oder die Art der Bewehrung variiert.

Von Interesse sind vor allem Kräfte, Verschiebungen an unterschiedlichen Positionen des Bewehrungsmaterials und Dehnungen, die mit den entsprechenden Werten eines weggesteuerten Referenzversuches verglichen werden.

3.5.2 Beanspruchung

Als Basis für die Zusammenstellung einer realitätsnahen Beanspruchung werden die Auswertungen aus den Abschnitten 2.3.1 und 2.4.3.3 herangezogen.

Bei einer zyklischen Vertikalbelastung ermittelten Yasuda et al. (1992), dass die aufbringbare Horizontalkraft aufgrund der phasenweise geringeren Vertikalspannung geringer ist als bei konstanter Vertikalspannung. Nimmegern und Bush (1991) stellten bei gleichzeitiger vertikaler und horizontaler Beanspruchung lediglich geringfügige Verdichtungserscheinungen fest. Die Erkenntnisse von Yasuda et al. (1992) zeigen, dass die Ergebnisse einer vertikal zyklischen Belastung bzw. einer Kombinationsbelastung signifikant von der zeitlichen Abfolge der Belastungen zueinander abhängen: Werden Vertikalspannungen und Horizontalkräfte zyklisch in Phase aufgebracht, d.h. erreichen sie gleichzeitig ein Maximum, so ergibt sich ein anderes Ergebnis als bei wechselweiser Aufbringung der Maxima. Da die genaue Verschiebung der vertikalen und horizontalen Maxima zueinander aus Messungen nicht bekannt ist, würde es sich um einen weiteren Versuchsparameter handeln, der zu variieren wäre. Da sich die verdichtende Wirkung vertikaler Zyklen (Nimmegern und Bush, 1991) horizontalkrafterhöhend auswirkt, wird in den zyklischen Modellversuchen auf der sicheren Seite liegend mit einer konstanten Vertikalspannung gearbeitet. Des Weiteren geht die Modellvorstellung von der These aus, dass vertikale Belastungen in der Realität im Bruchmechanismus horizontale Kräfte in das Bewehrungsmaterial induzieren. Da diese Induzierung aufgrund fehlender Verschiebungen am Versuchsstand nicht möglich ist, werden die horizontalen Kräfte direkt auf das Material aufgebracht. Diese prinzipielle Vorgehensweise ist mit einem großen Teil der in Abschnitt 2.4.3.3 recherchierten Versuchsabläufe vergleichbar. Dieses Modell wird durch die Vorstellung unterstützt, dass zyklische Einwirkungen, die auf dem aktiven Bereich auftreten, besonders sensibel und ungünstig wirken (Bild 2.5).

Nach Auswertungen des Abschnittes 2.3.1 wirkt sich die zyklische Belastung aus Verkehr bis in Tiefen von etwa 3,0 m deutlich aus. Für die zyklischen Modellversuche wird daher eine konstante vertikale Spannung von 30 kN/m^2 festgelegt: Dieser Wert entspricht einer Einbindetiefe von ca. 1,50 m.

Das horizontale Lastniveau setzt sich aus der statischen Grundlast und einer überlagerten zyklischen Belastung zusammen. Als Grundlage für die Festlegung der Beanspruchung dient der statische Referenzversuch mit identischen Parametern Auflast, Erdstoff, Bewehrungsmaterial und Einbindelänge sowie der statischen Referenzkraft F_p . Im zyklischen Modellversuch sind das Lastniveau (F_o/F_p) und die Amplitudengröße (A/F_p) in Abhängigkeit der statischen Referenzkraft zu variieren. Als Zielstellung für die Variation dient dabei die Erstellung einer repräsentativen Datenbasis im Gebrauchs- bzw. Verformungsbereich sowie eine qualifizierte Aussage zum Übergang in den Versagensbereich.

Die Frequenz hat nach Auswertungen im Abschnitt 2.4.3.3.3 im Bereich von 0,01 bis 0,5 Hz einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Versuchsergebnisse. Daher wird für die Reihen-

versuche eine Frequenz von einem Hertz festgelegt und die Literaturaussagen mit Frequenzvariationen von 0,2 und 2,5 Hz verifiziert. Nach Gotschol (2002) liegt die Frequenz von einem Hertz am unteren Ende des Frequenzbandes aus einer Eisenbahn-Verkehrsbelastung. Die gewählte Frequenz erweist sich als praktikabel für die Versuchsdurchführung, da sie zu vertretbaren Versuchsdauern führt und damit auch die Messrate und die Datenqualität auf hohem Standard manifestiert werden können.

3.5.3 Einflussparameter zur Variation

Entscheidende Parameter für die zyklischen Modellversuche stellen die in Abschnitt 3.5.2 erarbeiteten Beanspruchungsgrößen dar.

Von wesentlicher Bedeutung für die Ergebnisqualität, aber auch für die Versuchsdurchführung erweist sich weiterhin die Lastspielzahl. Bei der Wahl einer Lastspielzahl für die Reihenversuche ist eine Abwägung zwischen einer realistischen Beanspruchung in der Praxis, einer vertretbaren Versuchsdauer und Datenmenge sowie der Aussagekraft entsprechender Lastspielzahlen durchzuführen. Ziel muss es dabei sein, eine Aussage über den Einfluss der Variationsparameter treffen zu können, ohne dass eine der Lebensdauer einer bewehrten Konstruktion entsprechende Lastspielzahl aufgebracht werden muss. Vielmehr ist eine hohe Datenqualität und damit verbundene höhere Messfrequenz einer Erhöhung der Lastspielzahl vorzuziehen. Untersuchungen von Hanna und Touahmia (1991) belegen eine progressive Verschiebungsentwicklung bei Gittermaterialien, so dass eine begrenzte Extrapolation der Versuchsdaten möglich ist. Vorversuche zeigen, dass sich die Verschiebungsentwicklung der Proben bis etwa 1.000 Lastspiele aufgrund von Anfangseffekten noch deutlich verändern kann, so dass für die Reihenversuche 10.000 Lastspiele mit einer Versuchsdauer des zyklischen Teils von etwa 3 h festgelegt werden. Zu Prüfzwecken und zur Absicherung einer Extrapolation werden einige Versuche mit 10^5 Lastspielen vorgesehen.

Die im Abschnitt 2.4.3.2 extrahierten wesentlichen Einflussparameter aus dem statischen Bereich sind für die zyklischen Modellversuche ebenfalls von Relevanz.

Die Auswirkungen einer Auflastvariation werden durch Bezug auf den statischen Referenzversuch eliminiert. Die Legitimierung dieser These ist durch zwei Verifikationsversuche anderer Auflaststufen vorgesehen.

Der Erdstoff wird realitätsnah mit einer hohen Einbaudichte eingebracht. Hierzu wird einheitlich die maximal mit der Einrieselanlage produzierbare Lagerungsdichte gewählt.

Der Einfluss des Erdstoffes wird durch Verwendung zweier nicht-bindiger Bodenarten mit stark unterschiedlichen Körnungslinien überprüft, während der Einfluss der Geogittergeometrie und –herstellungsart durch Untersuchung von drei unterschiedlichen Geogitterarten und zwei wenig dehnbaren Vergleichsprodukten realisiert wird.

Die Lastabtragungsmechanismen im zyklischen Modellversuch werden beispielhaft an einem gelegten Geogitter untersucht, das als Regelprodukt und mit reduziertem Querstrebenanteil getestet wird.

3.5.4 Versuchsdurchführung

Für die Durchführung horizontal zyklischer Auszugsversuche liegen keine Norm- oder Regelwerke vor, so dass eine spezielle Versuchsdurchführung entwickelt wird.

Die Vorbereitung der Proben und der Einbau erfolgen dabei wie in Abschnitt 3.4.4 für den statischen Modellversuch beschrieben.

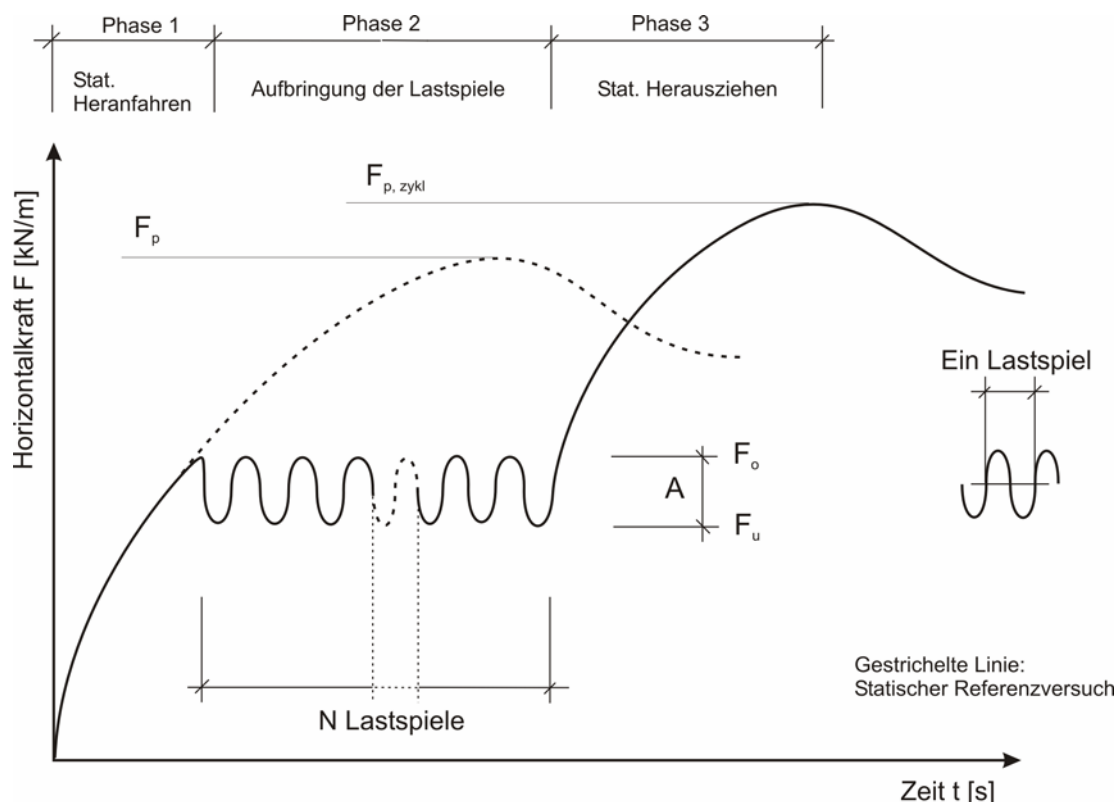


Bild 3.14: Schematischer Ablauf eines zyklischen Modellversuches mit dem statischen Referenzversuch zu Vergleichszwecken

Der Ablauf eines zyklischen Modellversuches besteht im Wesentlichen aus drei Phasen (Bild 3.14):

Nach Aufbringung der Vertikalspannung wird die Probe zunächst wie im statischen Modellversuch weggesteuert belastet, bis ein horizontales Lastniveau F_o erreicht wird (Phase 1). Ein Vergleich der Verschiebungen mit dem statischen Referenzversuch ermöglicht in dieser Phase eine Überprüfung des Versuches. Es erfolgt die Umschaltung in den zyklischen Modus mit der sinusförmigen Aufbringung von N Lastspielen zwischen den Lastniveaus F_o und F_u mit einer Frequenz f (Phase 2). Es schließt sich das weggesteuerte Herausziehen des Probenmaterials mit Aufzeichnung der maximalen Auszugskraft $F_{p, \text{zykl}}$ (Phase 3) an. Ein Ver-

gleich mit der maximalen Auszugskraft im statischen Referenzversuch F_p erlaubt Rückschlüsse auf eine Veränderung des Verbundverhaltens durch die Einwirkung der Zyklen.

Der Zeitaufwand eines Reihenversuches mit 10.000 Lastspielen beläuft sich in etwa auf einen Zeitraum von zwei Tagen. Aus Optimierungsgründen werden von einigen Autoren (Raju und Fannin, 1997; Min et al., 1995) Stufenversuche beschrieben, bei denen nach Aufbringung von N Lastspielen in einem weiteren Versuchsabschnitt das Oberlastniveau F_o angehoben bzw. das Unterlastniveau F_u abgesenkt wird. Da mit dieser Methodik weder der Vergleich mit dem statischen Referenzversuch ab der 2. Belastungsstufe möglich ist, noch die maximale Auszugskraft $F_{p, \text{zykl}}$ aus diesem Versuchsablauf gewonnen werden kann, wird jede Beanspruchungskombination in einem getrennten Versuch behandelt.

3.5.5 Versuchsprogramm

Es werden insgesamt 81 zyklische Modellversuche an den drei Geogittern G1 bis G3 sowie dem Stahlgitter und dem glatten Stahlblech durchgeführt.

Für die Sandversuche wird bei Geogitter G1 und G2 eine Regelauflast von 30 kN/m^2 und für die Kiesversuche 10 kN/m^2 definiert. Alle Versuche werden praxisorientiert mit der maximal einbringbaren Lagerungsdichte durchgeführt. Bei den Geogitteruntersuchungen sind umfangreiche Variationen der zyklischen Einflussparameter Lastniveau und Amplitude durchgeführt worden. Die Regelfrequenz beträgt ein Hertz mit einer Variation von 0,2 bis 2,5 Hertz bei Versuchen mit Geogitter G2 zur Überprüfung der Frequenzabhängigkeit der Versuchsergebnisse. Zur Überprüfung der Allgemeingültigkeit eines Bezuges der zyklischen Modellversuche auf den statischen Referenzversuch sind jeweils zwei Versuche mit Geogitter G2 mit einer auf 0,92 m reduzierten Einbindelänge sowie einer auf 53 kN/m^2 erhöhten Auflast durchgeführt worden. Da eine Dehnungsmessung in der freien Länge während eines zyklischen Modellversuches bei Geogitter G2 aus Geometrie Gründen nicht möglich ist, wurde ein zusätzlicher zyklischer Modellversuch ohne Bodenkontakt zur Ermittlung des zyklischen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens angesetzt.

Das Stahlgitter wurde in drei zyklischen Modellversuchen untersucht: Diese dienen lediglich zu einer Überprüfung des Verbundverhaltens an einem steifen Material und damit zu einer möglichen Verallgemeinerung der Versuchsergebnisse.

Die Versuche am glatten Stahlblech werden zur Analyse der unterschiedlichen Lastabtragungsmechanismen durchgeführt. Es wird überprüft, ob ein ausschließlicher Reibungsverbund zu plötzlichen Verschiebungsänderungen des Probenmaterials führt.

Detaillierte Angaben über die Eingangsparameter aller zyklischer Modellversuche sind dem Anhang C.4 zu entnehmen.

4 Ergebnisse der statischen Index- und Modellversuche

4.1 Einführung

Im ersten Abschnitt des Untersuchungsprogramms ist eine Vielzahl weggesteuerter Index- und Modellversuche durchgeführt worden. Diese Tests sind mit einer Versuchskennung codiert worden, aus der wesentliche Versuchsparameter zu entnehmen sind. Eine Detailübersicht ist den Anhängen C.2 und C.3 zu entnehmen.

Die weggesteuerten Untersuchungen dienen zum einen als Referenzversuche für eine Normalisierung der zyklischen Tests, zum anderen der Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Parameter auf das Auszugsverhalten. Da diese Parameter sich auch auf die zyklischen Versuche auswirken, können die Ergebnisse ohne zusätzliche zyklische Parameterstudie auf diese Tests übertragen werden.

Die Indexversuche an einem Auszugskasten mit halbiertem Länge dienen der Variation der Parameter Einbaudichte und Auflast, während in den Modellversuchen die Art des Bewehrungsmaterials, die Einbindelänge, die Art des Erdstoffes und zusätzlich die Auflast variiert worden sind.

Wesentliche Erkenntnisse der statischen Versuchsreihen, die für die zyklischen Modellversuche relevant sind, werden jeweils am Ende eines Abschnittes kurz zusammengefasst.

4.2 Reproduktionsversuche und Horizontalkraftinkonsistenzen

In Bild 4.1 wird die gemessene Horizontalkraft in Abhängigkeit der Verschiebung der ersten instrumentierten Querstrebe des Bewehrungsmaterials für vier Modellversuche dargestellt. Da die erste instrumentierte Querstrebe (Wegaufnehmer 1 = WA 1) bei allen vorgestellten Versuchen identisch positioniert ist, wird diese Darstellung als Referenz gewählt, da sie eine optimale Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet.

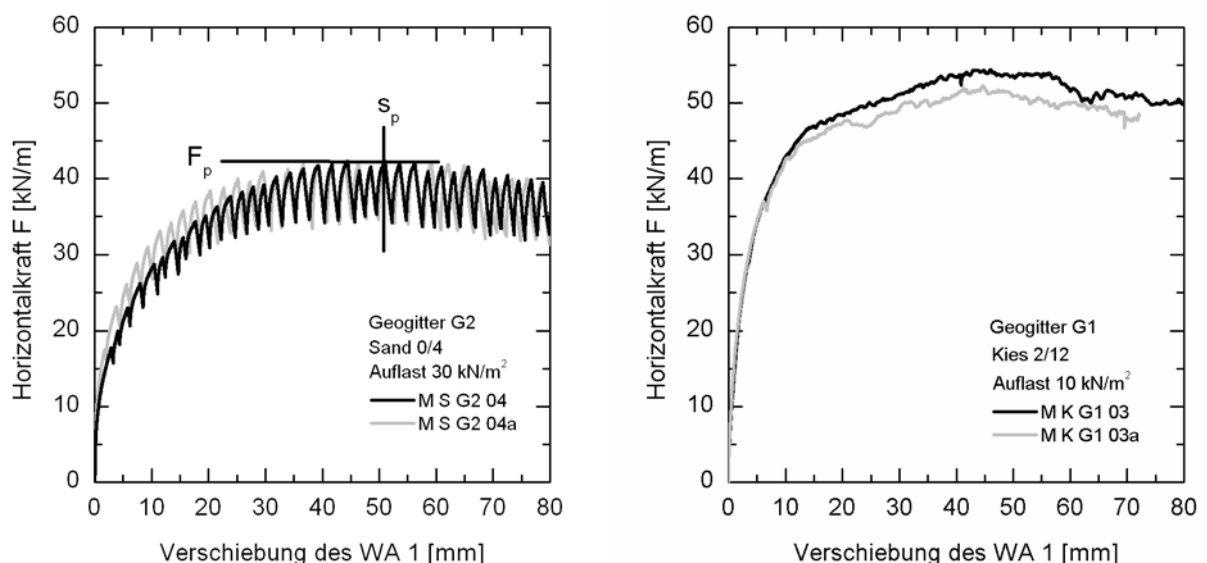


Bild 4.1: Reproduzierbarkeit des statischen Modellversuches

Die Größenordnungen der Auszugskräfte liegen in den von Farrag et al. (1993) vorgestellten Dimensionen. Die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse ist unabhängig von Bewehrungsmaterial und Erdstoff als gut zu bezeichnen.

Einflüsse auf die Versuchsergebnisse konnten bei minimalen Schwankungen der Einbaudichte des Erdstoffes und bei Herstellungstoleranzen der Bewehrungsproben – insbesondere bei Geogitter G2 – beobachtet werden. Diese Parameter wurden daher mit besonderer Sorgfalt überwacht.

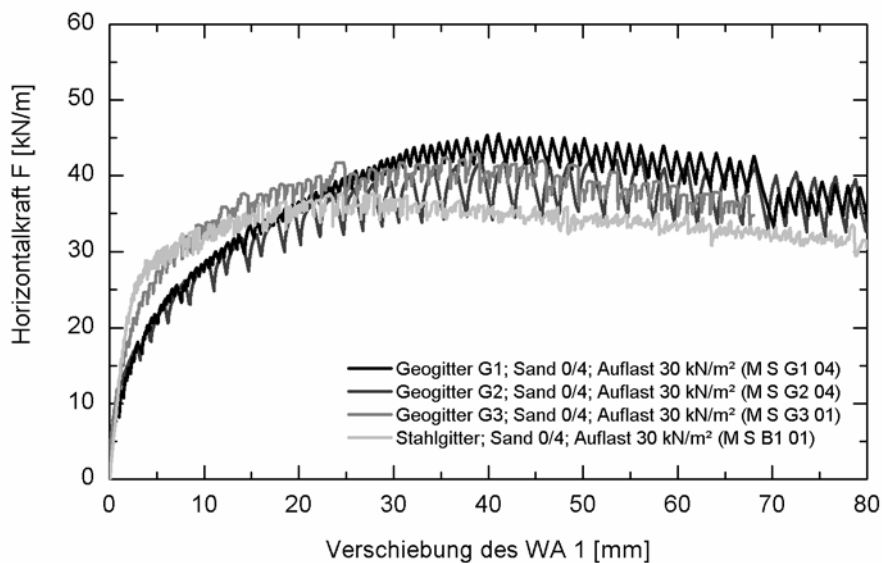
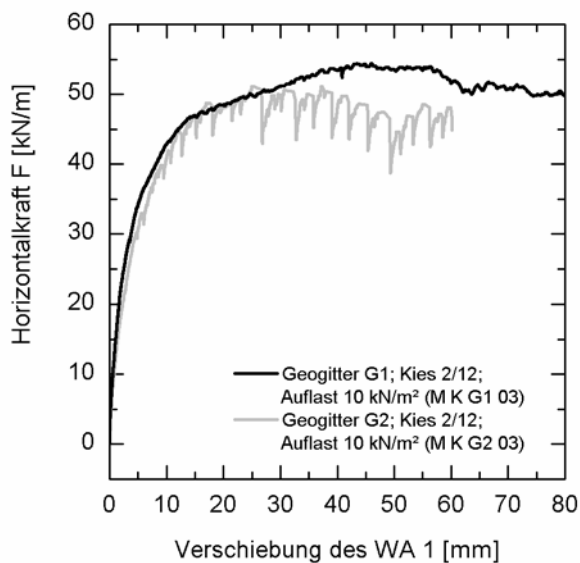
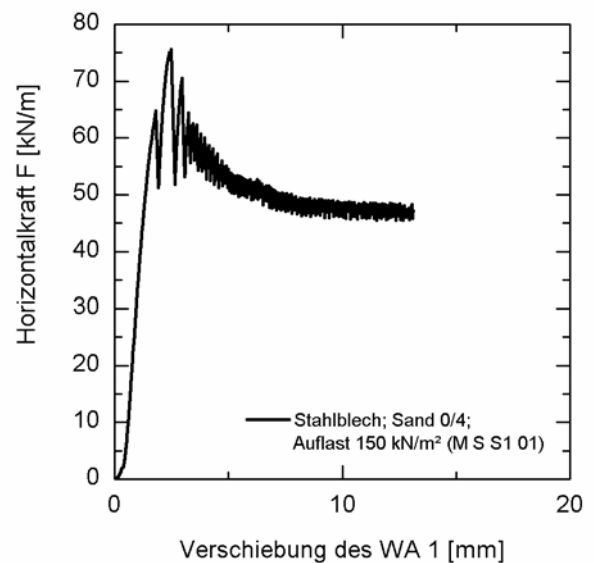
Als entscheidende Parameter sind dieser Versuchsdarstellung die maximal erreichte Auszugskraft F_p (= Peakkraft) sowie die Verschiebung der ersten instrumentierten Querstrebe s_p zum Zeitpunkt von F_p zu entnehmen. Es zeigt sich, dass der exakte Peakzeitpunkt nicht immer eindeutig bestimmbar ist, da die Horizontalkraft nach einer bestimmten Auszugsverschiebung ein Sattelniveau erreichen kann.

Der ausgeprägt unstetige Verlauf der Horizontalkraft bei Geogitter G2 ist auf die Lastabtragung über Reibung und Erdwiderstand zurückzuführen (Abschnitt 2.4.3.1): Tritt bei höheren Horizontalkräften eine Überschreitung des vor den Querstreben aufnehmbaren Erdwiderstandes ein, kommt es zu einer kurzzeitigen Komplettaktivierung der Probe, die mit einem Horizontalkraftabfall verbunden ist. Wird durch einen erneut aufgebauten Erdwiderstand – aufgrund einer größeren aktivierten Einbindelänge – ein Verschiebungsstillstand erreicht, so ist ein weiterer Anstieg der Horizontalkraft zu beobachten. Dieses Phänomen wird in Abschnitt 4.6 detaillierter untersucht.

4.3 Einfluss des Bewehrungsmaterials

4.3.1 Art des Bewehrungsmaterials

Bild 4.2 zeigt die Horizontalkraft-Verschiebungs-Kurven für die drei untersuchten Geogitter, das Stahlgitter und das Stahlblech. Bei identischem Auflastniveau sind sowohl die Kraftverläufe als auch die maximale Auszugskraft und ihre Position bei den Geogittern im Sand und im Kies weitgehend vergleichbar. Lediglich die Unstetigkeit der Horizontalkraft ist bei Geogitter G2 ausgeprägter als bei den anderen Gittermaterialien. Es ist ein deutlich ausgeprägteres Peakverhalten der Geogitter G1 und G3 gegenüber G2 zu identifizieren (siehe auch Bild 4.11). Das Stahlgitter zeigt bei geringeren Verschiebungen s_p ein geringfügig kleineres F_p . Das Stahlblech weist bei einer deutlich höheren Auflastspannung eine sofortige Horizontalkraftaufnahme bei sehr geringen Materialverschiebungen auf, die nach einem ausgeprägten Peak deutlich abfällt (Bild 4.2).

a. Sand 0/4; Gittermaterialien mit 30 kN/m² Auflastb. Kies 2/12; Gittermaterialien mit 10 kN/m² Auflastc. Sand 0/4; Geschlossenes Stahlblech mit 150 kN/m² Auflast**Bild 4.2:** Einfluss des Bewehrungsmaterials und des Erdstoffes auf die Entwicklung der Horizontalkraft

Die unterschiedlichen Kurvenverläufe werden im Wesentlichen von den Lastabtragungsmechanismen und der Aktivierung des Probenmaterials beeinflusst. Das Stahlblech trägt die eingeleiteten Horizontalkräfte ausschließlich über die Reibungskomponente ab, so dass es nach Überschreitung der Grenzscherfestigkeit zu einem Abfall auf die Restscherfestigkeit und damit zu einem ausgeprägten Peakverhalten kommt. Die Gittermaterialien beteiligen zusätzlich Erdwiderstands- bzw. Interlockkomponenten am Lastabtrag. Diese werden durch

die Steifigkeit des Materials, seiner Knoten, die Fläche vor den Querstreben, den Erdstoff und die Auflast beeinflusst.

Bild 4.3 kann als Indikator für die Dehnsteifigkeit des Probenmaterials und die Aktivierung der Einbindelänge herangezogen werden: Während beim Stahlgitter eine Starrkörperverschiebung mit einer gleichmäßigen Materialaktivierung zu beobachten ist, kommt es insbesondere bei Geogitter G1 zu erheblichen Materialdehnungen bei deutlich geringeren Verschiebungen der letzten instrumentierten Querstrebe. Bei WA 5 handelt es sich um die hintere instrumentierte Querstrebe des Probenmaterials (vgl. Abschnitt 3.3).

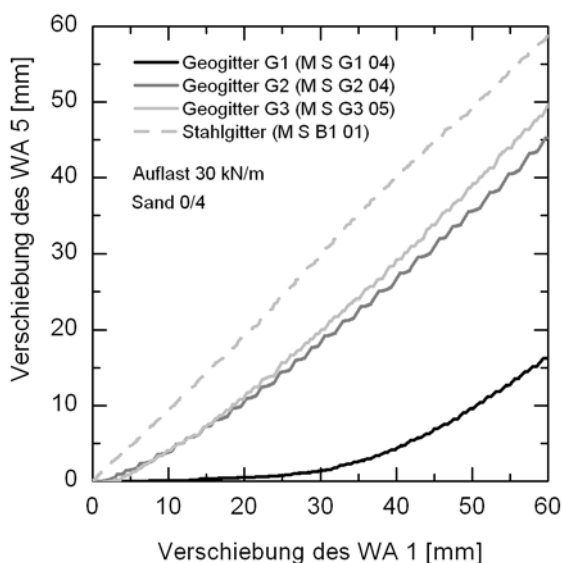


Bild 4.3:

Aktivierung der Einbindelänge bei unterschiedlichen Bewehrungsmaterialien

Da das Lastabtragungsverhalten wesentlich von der Art und Dehnsteifigkeit des Bewehrungsmaterials abhängt, werden zyklische Modellversuche mit unterschiedlichen Bewehrungsmaterialien durchgeführt.

4.3.2 Einbindelänge des Bewehrungsmaterials

Bei der Einbindelänge des Bewehrungsmaterials handelt es sich um einen Schlüsselparаметer, da er in der Praxis zum Optimum variiert wird.

Im Anfangsbereich ist bei allen vier untersuchten Einbindelängen des Geogitters G1 ein vergleichbarer Kraftanstieg zu beobachten (Bild 4.4). Mit steigender Einbindelänge ist eine Erhöhung der maximalen Auszugskraft F_p zu verzeichnen: Dieser Zusammenhang ist für den untersuchten Bereich für Geogitter G1 und G2 in guter Näherung durch eine lineare Regression abzubilden (Bild 4.5). Eine Extrapolation der Ergebnisse im Bereich von 50 – 140 cm wird als zulässig erachtet. Die Aussagen sind mit den Erkenntnissen in Abschnitt 2.4.3.2.6 für einen niedrigen Auflastbereich vergleichbar. Bei höheren Auflasten können sich hiervon abweichende Ergebnisse ergeben.

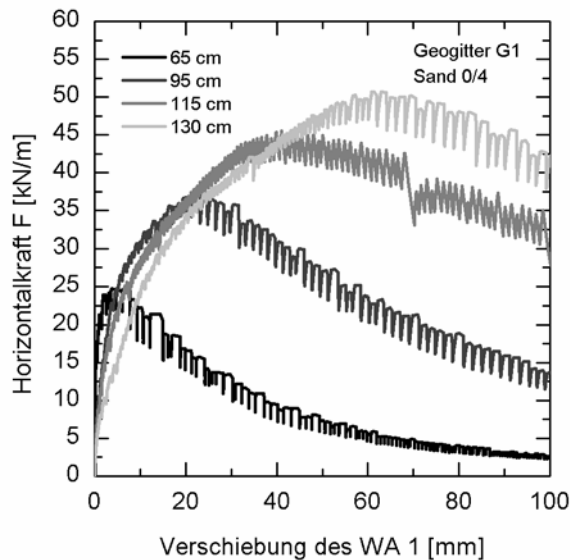


Bild 4.4: Einfluss der Einbindelänge auf die Entwicklung der Horizontalkraft

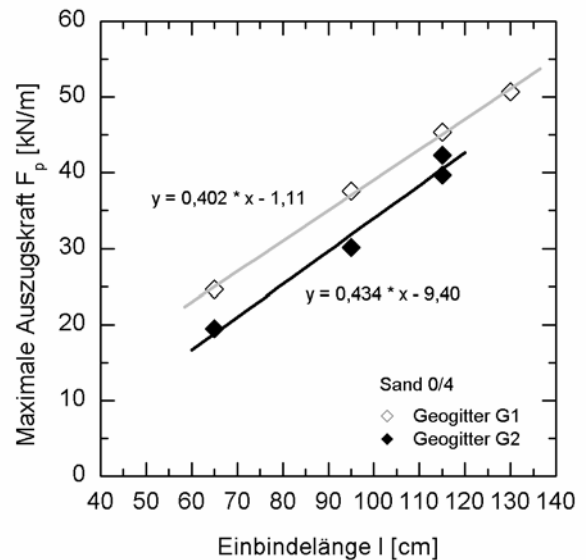
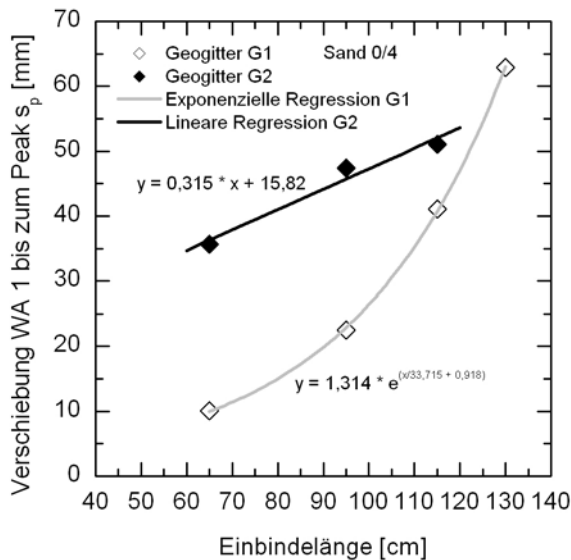


Bild 4.5: Einfluss der Einbindelänge auf die maximale Auszugskraft

Die Peakverschiebung der ersten instrumentierten Querstrebe s_p nimmt mit steigender Einbindelänge zu. Bei Geogitter G2 lässt sich dieses Phänomen durch eine lineare Regression, bei Geogitter G1 durch eine exponentielle Regression sehr gut approximieren (Bild 4.6).

Die maximale Auszugskraft F_p wird zu dem Zeitpunkt erreicht, an dem das Integral der Lastabtragung über die Einbindelänge sein Maximum erreicht. Dieses Maximum wird bei größeren Einbindelängen erst bei größeren Verschiebungen s_p erreicht, da größere Probenlängen aktiviert werden müssen. Insbesondere bei der geringeren Dehnsteifigkeit des Geogitters G1 (Bild 4.3) kommt es dabei zu größeren Materialdehnungen, aus denen deutlich größere Peakverschiebungen resultieren. Entsprechende Erkenntnisse sind ebenfalls von Watts und Brady (1990) dokumentiert worden (Abschnitt 2.4.3.2.6).

**Bild 4.6:**

Einfluss der Einbindelänge auf die Verschiebung zum Zeitpunkt der maximalen Auszugskraft

Der Parameter Einbindelänge kann im Rahmen der zyklischen Modellversuche nur exemplarisch betrachtet werden. Da der Einfluss in den weggesteuerten Versuchsreihen sehr gut analytisch dargestellt werden kann, wird dieser Parameter über eine Normalisierung der zyklischen Tests auf den statischen Referenzversuch abgebildet.

4.4 Einfluss des Erdstoffes

4.4.1 Art des Erdstoffes

Die Art des Erdstoffes hat erhebliche Auswirkungen auf die Größe der maximalen Auszugskraft F_p (Bild 4.2): Bei einem Auflastniveau von einem Drittel der Vertikalbelastung im Sandversuch können im Kiesversuch größere Horizontalkräfte aufgebracht werden. Dies verdeutlicht die erheblich bessere Verbundwirkung zwischen Probenmaterial und Erdstoff bei Kies. Zu vermuten ist, dass beim Kies Interlockeffekte gegenüber Erdwiderstandseffekten dominieren; dies wird auch durch die Tatsache untermauert, dass die Unstetigkeiten in der Horizontalkraft-Verschiebungs-Kurve bei Kies deutlich weniger ausgeprägt sind, da die Möglichkeit eines plötzlichen „Durchrutschens“ des Probenmaterials durch den Erdstoff vermindert wird. Interlockeffekte führen zu verbessertem Verbundverhalten, da die Scherfuge von der Grenzfläche Probenmaterial – Boden in den Boden hineinverlagert wird (Abschnitt 2.4.3.1). Die deutlich größeren maximalen Auszugskräfte grobkörnigerer Erdstoffe werden in der Literatur bestätigt (Abschnitt 2.4.3.2.4).

Die Wirksamkeit einer Kombination Erdstoff/Gittermaterial wird in der Literatur häufig über den Parameter SDR (kleinere Öffnungsweite zu mittlerem Korndurchmesser) klassifiziert (Abschnitt 2.4.3.2.4). Demnach liegt bei $SDR \rightarrow 1$ ein optimales Verbundverhalten vor. Tabelle 4.1 zeigt dabei aufgrund des günstigeren mittleren Korndurchmessers des Kiesel die deutlich dichter am Optimum liegenden Kenngrößen des Kiesel im Vergleich zum Sand.

Tabelle 4.1: Kenngröße SDR für die verwendeten Geogitter

Eigenschaft	Einheit	Geogitter G1 (gewebt)	Geogitter G2 (extrudiert)	Geogitter G3 (gelegt)
SDR in Produktionsrichtung (Sand/Kies)	--	30,3/2,9	331,8/32,2	107,6/(10,4)
SDR in Querrichtung (Sand/Kies)	--	30,3/2,9	24,2/2,4	42,4/(4,1)

Exemplarisch werden in Bild 4.7 die Materialbeschädigungen bei zwei Kiesversuchen im vorderen Bereich der Probe gezeigt. Zu erkennen ist bei Geogitter G2 die deutliche Beanspruchung der Querstreben vorderseite durch den Interlockeffekt. Ein „Durchschneiden“ des Erdstoffes durch die Querstreben wird aufgrund der größeren Kornfraktionen erheblich erschwert. Verantwortlich hierfür sind insbesondere die Komponenten der Roll- und Gefügereibung, die zu einer Erhöhung der Scherkräfte führen, wenn größere Kornfraktionen im Gefüge umgelagert werden müssen.

Bei Geogitter G1 ist ein Versagen einiger Längsstreben sowie die Beschädigung der Beschichtung der Längsstreben zu beobachten. Ähnliche Erkenntnisse werden von Watts und Brady (1990) bei einem vergleichbaren Material publiziert.

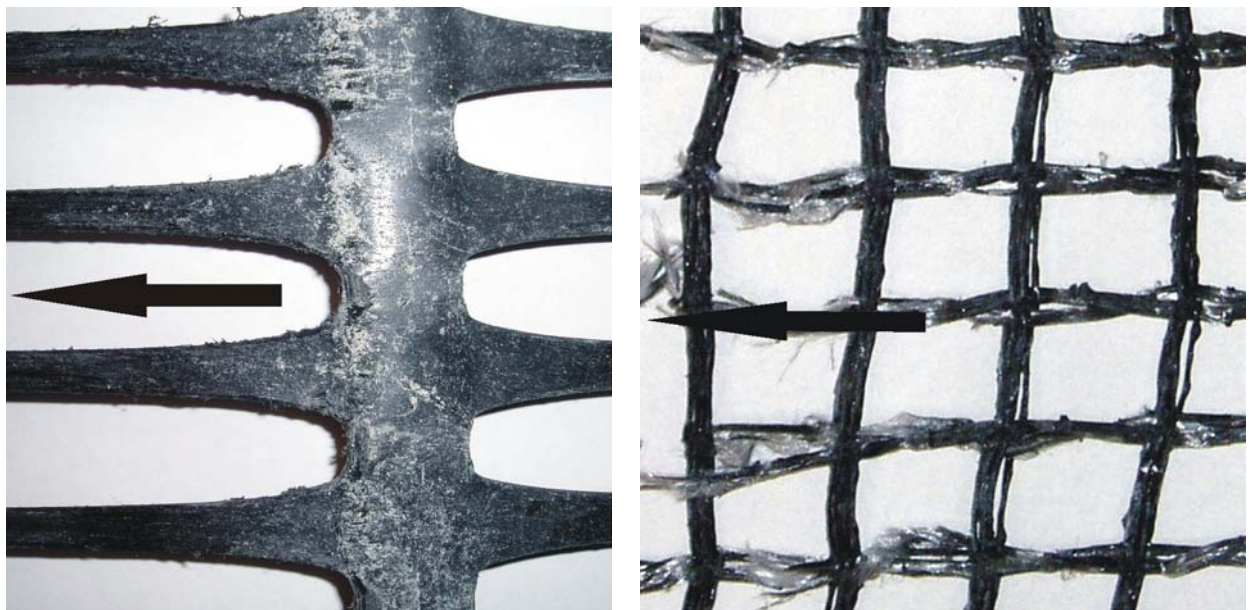


Bild 4.7: Beanspruchung der Geogitter G1 und G2 nach einem statischen Auszugsversuch im Kies 2/12 mit Angabe der Zugrichtung (provoziertes Versagen)

Aufgrund des erheblichen Einflusses des Erdstoffes auf das Lastabtragungsverhalten und die maximale Auszugskraft werden beide Materialien im Rahmen der zyklischen Modellversuche untersucht.

4.4.2 Einbaudichte des Erdstoffes

Der hier vorgestellte Einfluss der Einbaudichte auf das Verbundverhalten ist in Indexversuchen im Sand 0/4 bei einer mittleren Einbindelänge von 0,50 m ermittelt worden. Ein direkter Vergleich der Verschiebung s_p zum Zeitpunkt der maximalen Auszugskraft F_p mit den Modellversuchen ist daher nicht möglich (Abschnitt 4.3.2).

Die maximale Auszugskraft steigt mit zunehmender Einbaudichte deutlich an, während die Verschiebung s_p zum Zeitpunkt der maximalen Auszugskraft weitgehend unabhängig von der Einbaudichte ist (exemplarische Darstellung für Geogitter G1: Bild 4.8). Im Bereich niedriger und mittlerer Einbaudichten sind die Unterschiede der maximalen Auszugskraft sowohl für Geogitter G1 als auch für Geogitter G2 minimal (Bild 4.9). Zu vermuten ist, dass durch die Auflastaufbringung eine Nachverdichtung der Einbaudichte $1,70 \text{ g/cm}^3$ stattgefunden hat, so dass während des Versuches vergleichbare Dichteverhältnisse vorlagen. Die höhere Auflast von 60 kN/m^2 verstärkt diesen Effekt zusätzlich. Zwischen $1,75$ und $1,80 \text{ g/cm}^3$ kommt es beim Stahlblech zu geringeren Kraftanstiegen als bei den Gittermaterialien. Dies legt den Schluss nahe, dass Lastabtragungsmechanismen vor den Querstreben von der höheren Einbaudichte stärker profitieren als die reibungsbasierten Lastabtragungsmechanismen des Stahlbleches. Wird von einer Grundbruchtheorie für die Lastabtragung vor den Querstreben ausgegangen, so erhöht sich das Kraftübertragungspotenzial durch höhere Dichte und Vergrößerung des Reibungswinkels durch die Dichteerhöhung (Jewell, 1996). Insbesondere für das Peakverhalten zeigt sich die Relevanz der Einbaudichte auch in der zu ähnlichen Werten abfallenden Horizontalkraft bei großen Verschiebungen („Restreibung“, Bild 4.8).

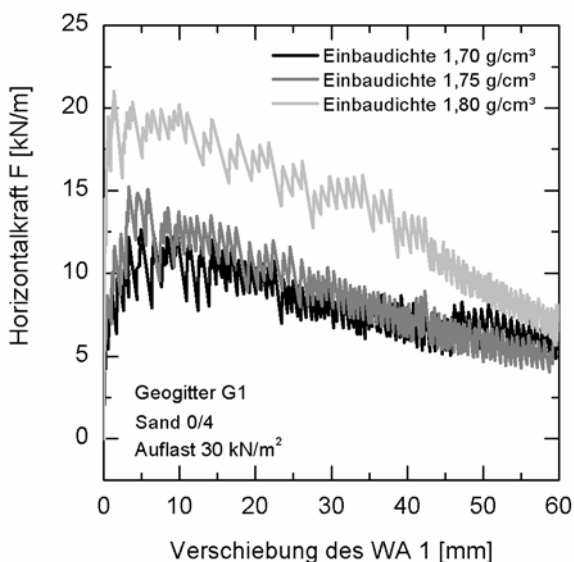


Bild 4.8: Entwicklung der Horizontalkraft bei variierender Einbaudichte

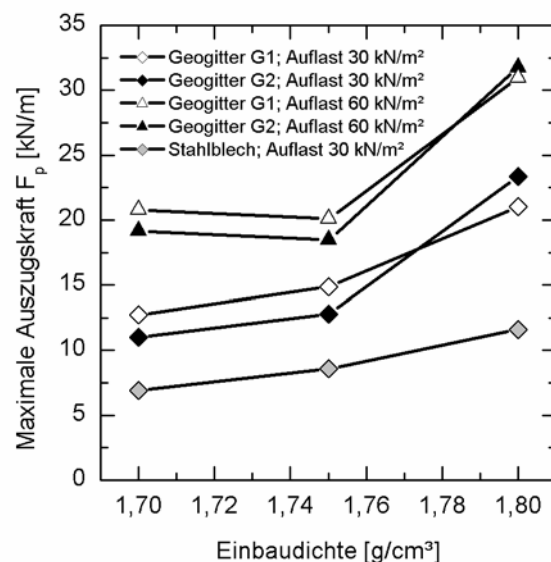


Bild 4.9: Entwicklung der maximalen Auszugskraft bei unterschiedlichen Einbaudichten und Bewehrungsmaterialien

Im Dichtebereich von 1,75 bis 1,80 g/cm³ kann für beide untersuchten Geogitter von einer linearen Zunahme der maximalen Auszugsspannung τ_p mit der Auflast ausgegangen werden (Bild 4.10). Aufgrund der geschilderten Zusatzverdichtung durch die Auflast kann für die Dichte 1,70 g/cm³ keine allgemeingültige Aussage getroffen werden.

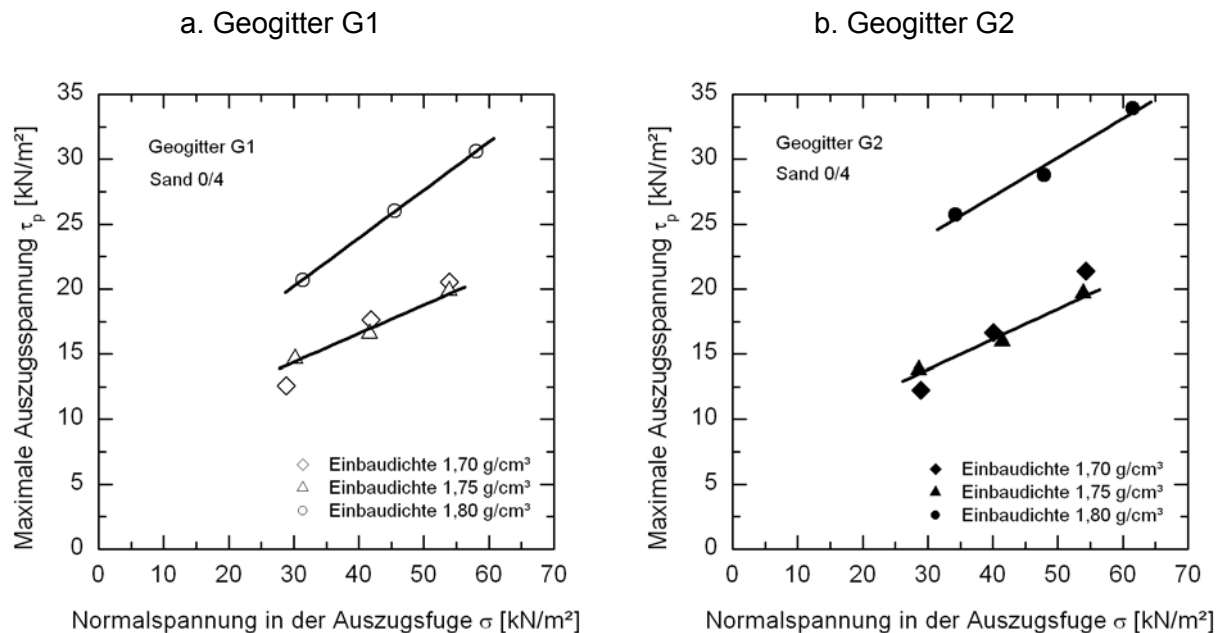


Bild 4.10: Entwicklung der maximalen Auszugsspannung in Abhängigkeit der Normalspannung in der Auszugsfuge

Zusammenstellungen aus der Literatur bestätigen die deutliche Zunahme der maximalen Auszugsspannung mit steigender Einbaudichte (Abschnitt 2.4.3.2.3).

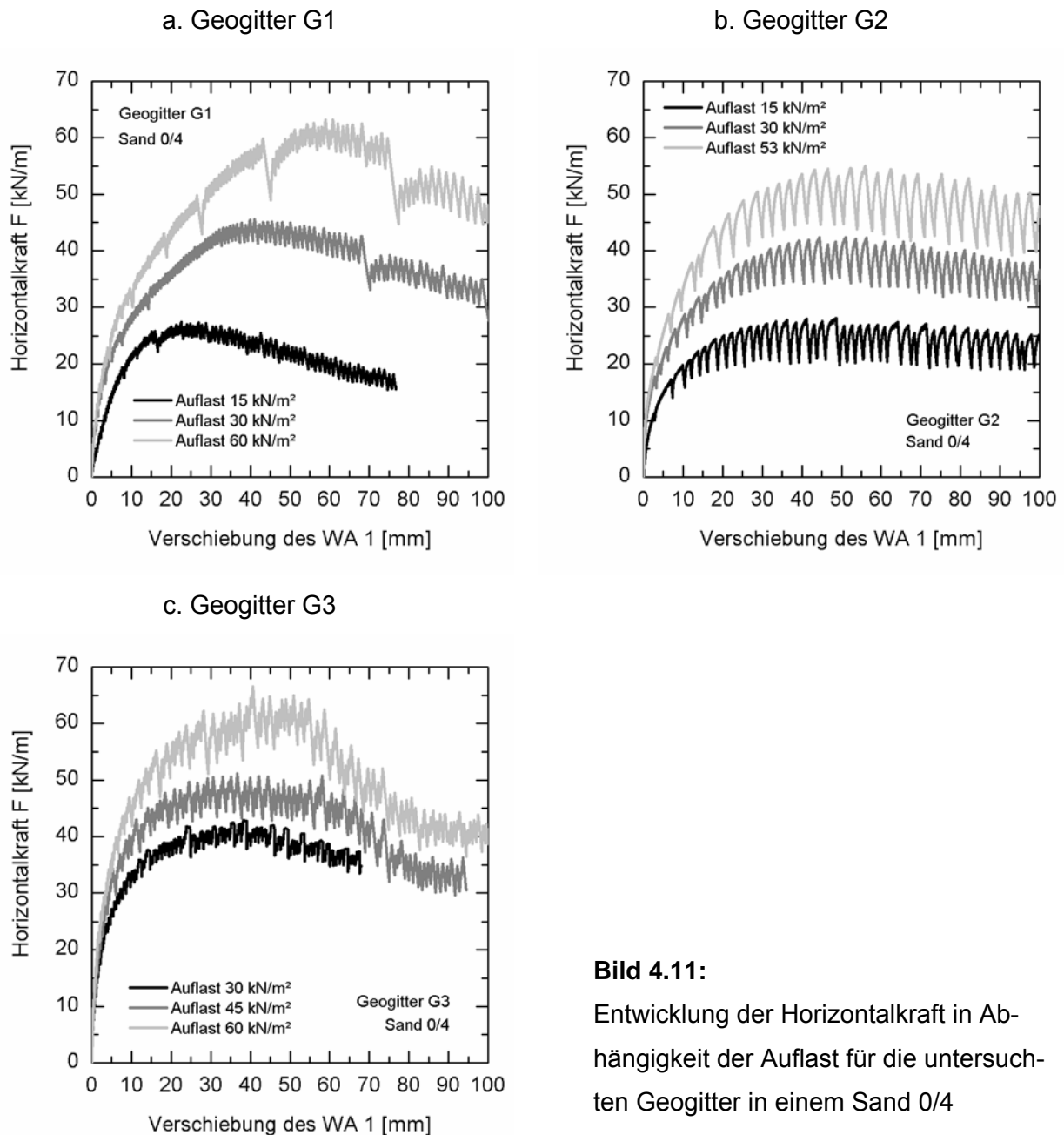
Für die zyklischen Modellversuche wird einheitlich die maximal erzielbare Einbaudichte von 1,80 g/cm³ gewählt, weil sie mit den hohen Einbaudichten der Praxis vergleichbar ist. Auch für den Kies wird die mit der Einrieseltechnik maximal erzielbare Einbaudichte gewählt.

4.5 Einfluss der Auflast

Die Auflast erweist sich als sehr wichtiger Parameter, da der Einfluss auf die Versuchsergebnisse signifikant ist und dieser Parameter in der Praxis tiefenabhängig innerhalb einer Konstruktion variabel ist. Im Folgenden werden Auflastbereiche untersucht, die sowohl für ein mögliches Auszugsversagen als auch für eine zyklische Verkehrsbelastung von Relevanz sind.

Die Horizontalkraft-Verschiebungskurven zeigen eine deutliche Zunahme der maximalen Auszugskraft mit zunehmender Auflast bei späterem Eintreten des Peaks (Bild 4.11). Dies

resultiert zum einen aus einer Reibungserhöhung aus der zusätzlichen Auflast, zum anderen aus einer Erhöhung der horizontalen Spannung σ_b vor den Querstreben (Jewell, 1996). Unstetigkeiten der Horizontalkraft nehmen mit der Auflast zu. Die absoluten Größenordnungen der maximalen Auszugskraft sind bei allen Geogittern vergleichbar.



Vergleichbare Tendenzen liegen für die Untersuchungen im Kies 2/12 vor (Anhang D.1). Aufgrund der deutlich höheren maximalen Auszugskräfte musste die Auflast für diesen Erdstoff deutlich reduziert werden. Starke Dilatanzerscheinungen machten eine vertikal frei gelagerte Lastaufbringung erforderlich.

Der maximale Auszugswiderstand τ_p nimmt für alle untersuchten Geogitter näherungsweise linear mit steigender Spannung in der Auszugsfuge σ zu (Bild 4.12, Bild 4.13 und Anhang D.1). Im Sand sind deutliche Unterschiede zwischen Index- und Modellversuchen auszumachen, wobei die als Reibungsanteil zu bezeichnende Steigung der jeweiligen Geraden vergleichbar ist. Möglich sind prozentual stärkere Randeinflüsse durch die Frontwand (Gewölbeausbildung) bei den Indexversuchen. Auch Farrag et al. (1993) berichten von größeren Horizontalkräften bei der Verwendung eines kleineren Auszugskastens.

Für den Kies 2/12 ist die Spannung in der Auszugsfuge σ mit zwei Methoden ermittelt worden: Zum einen wurde σ aus der aufgetragenen Auflast und dem Bodeneigengewicht bestimmt (als „Gewölbetheorie“ bezeichnet), zum anderen erfolgte die Berechnung mit gemessenen Spannungen unter Berücksichtigung des Dilatanzeinflusses des Erdstoffes (als „Volle Dilatanzberücksichtigung“ bezeichnet). Damit wird der normalspannungserhöhenden Wirkung einer eingeschränkten Dilatanz in der Auszugsfuge Rechnung getragen.

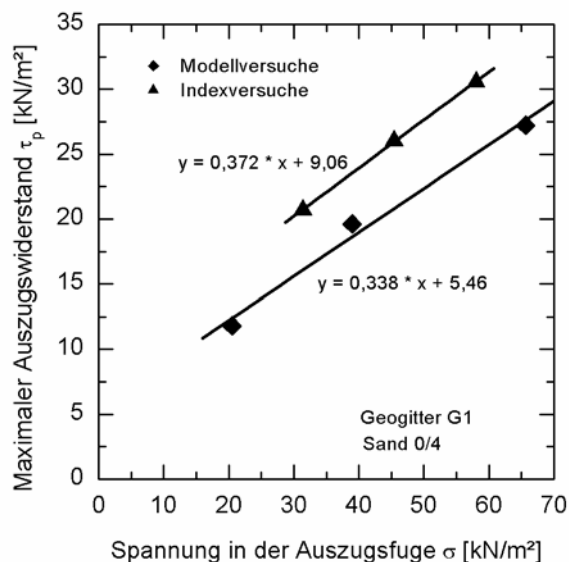


Bild 4.12: Maximaler Auszugswiderstand bei Index- und Modellversuchen im Vergleich

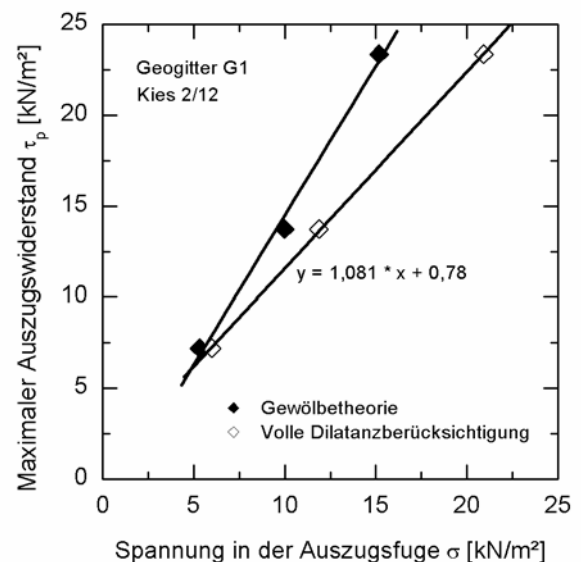


Bild 4.13: Maximaler Auszugswiderstand bei Kies in Abhängigkeit der verwendeten Theorie zur Berechnung der Spannung in der Auszugsfuge

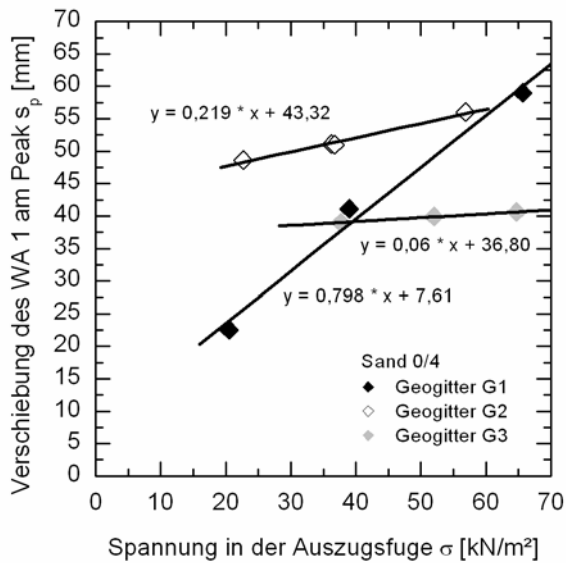


Bild 4.14: Entwicklung der Peakverschiebung in Abhängigkeit der Spannung in der Auszugsfuge

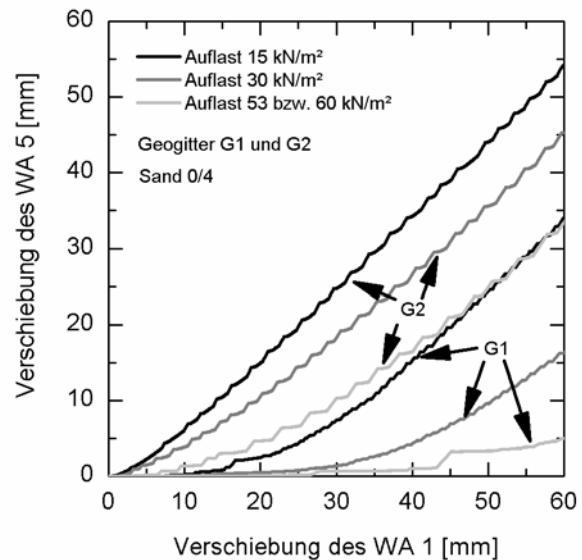


Bild 4.15: Aktivierung der eingebetteten Probenlänge in Abhängigkeit von Auflast und Geogitter

Bild 4.14 verdeutlicht, dass die Zunahme der Verschiebungen s_p mit steigender Auflast bei den dehnsteiferen Geogittern G2 und G3 erheblich moderater ausfallen als bei Geogitter G1. Steife Bewehrungsmaterialien werden bereits nach geringen Verschiebungen über eine größere Länge aktiviert (Abschnitt 4.3.1). Bei höheren Auflasten erhöhen sich die Materialdehnungen, und für die Aktivierung der gesamten Einbindelänge sind größere Verschiebungen erforderlich (Bild 4.15). Aufgrund der geringeren Dehnsteifigkeit wirkt sich dieser Effekt bei Geogitter G1 stärker aus. Dieses Materialverhalten kann als „Bezogene Materialsteifigkeit“ bezeichnet werden, da es über das Spannungs-Dehnungsverhalten auch von der Auflast und der Geometrie beeinflusst wird.

Die absolute Größe von s_p ist ebenfalls deutlich auflastabhängig: Während bei Geogitter G1 46 Querstreben mit jeweils vergleichsweise geringer Fläche vor den Querstreben eingebettet sind, liegen bei Geogitter G2 5 Querstreben mit größeren Flächen vor den Querstreben im Bereich der Einbindelänge. Bei kleineren Auflasten wirkt Geogitter G1 verhältnismäßig dehnsteif (Bild 4.15) und kann einen Großteil der Querstreben bei kleinen Verschiebungen aktivieren. Wird aber die Auflast erhöht, so kommt es zu größeren Dehnungen – vor allem im vorderen Bereich –, so dass dort aufgrund des geringen Querstrebenabstandes von 22 mm Querstreben bereits in Bodenbereiche gelangen, die von vorherigen Querstreben gestört worden sind und daher weniger Lastabtragungspotenzial bieten. Die Folge ist eine Weiterleitung von Kräften in den hinteren Bereich bei steigenden Gesamtverschiebungen, während sich die Lastaktivierung bei Geogitter G2 aufgrund geringerer Dehnungsunterschiede nicht so deutlich mit der Auflast verändert.

Entsprechend einer mittleren Einbindetiefe von 1,5 bis 2,0 m wird für die Mehrzahl der zyklischen Modellversuche eine Regelauflast von 30 kN/m² gewählt. Es handelt sich dabei um eine repräsentative Größenordnung im Rahmen des untersuchten Auflastbereiches.

4.6 Lastabtragungsverhalten der Bewehrungsmaterialien

4.6.1 Einführung

Bei der Lastabtragung handelt es sich um die Übertragung von im Bewehrungsmaterial enthaltenen Kräften in den umgebenden Erdstoff. Das Lastabtragungsverhalten wird durch die Parameter Lastabtragungsmechanismen, Bewehrungsgeometrie und –steifigkeit, Kornverteilung und –größe, Auflast und Einbindelänge beeinflusst.

Aussagen über Art und Größenordnung sowie Einflussparameter der Lastabtragung können in der vorliegenden Versuchsanordnung im Wesentlichen aus der Verschiebungs- und Dehnungsentwicklung sowie einer Variation des Querstrebenanteils entnommen werden.

4.6.2 Inkonsistenzen der Horizontalkraft

Das Phänomen der Inkonsistenz der Horizontalkraft wird im Folgenden am Beispiel des Geogitters G2 exemplarisch betrachtet, da das Auftreten hier am signifikantesten ist.

Es handelt sich dabei um eine plötzliche Verschiebung des Bewehrungsmaterials über seine gesamte Einbindelänge (Bild 4.16) mit geringfügiger Abnahme der Dehnungen in den vorderen eingebetteten Abschnitten. Die Materialverschiebung muss durch eine Dehnungsreduzierung in der freien Länge komplett aufgenommen werden, da an der Klemme keine Inkonsistenzen zu beobachten sind. Die Inkonsistenzen treten erst nach einer Anfangsverschiebung ab einem bestimmten Lastniveau auf und sind bei Geogitter G2 am ausgeprägtesten. Im Kies und bei reduziertem Querstrebenanteil (Abschnitt 4.6.5) sind geringere Inkonsistenzen zu beobachten. Ebenso neigen glatte Kunststoffstreifen zu geringeren Inkonsistenzen, die hier erst nach dem Peak im Restscherbereich zu beobachten sind (Emersleben, 2003).

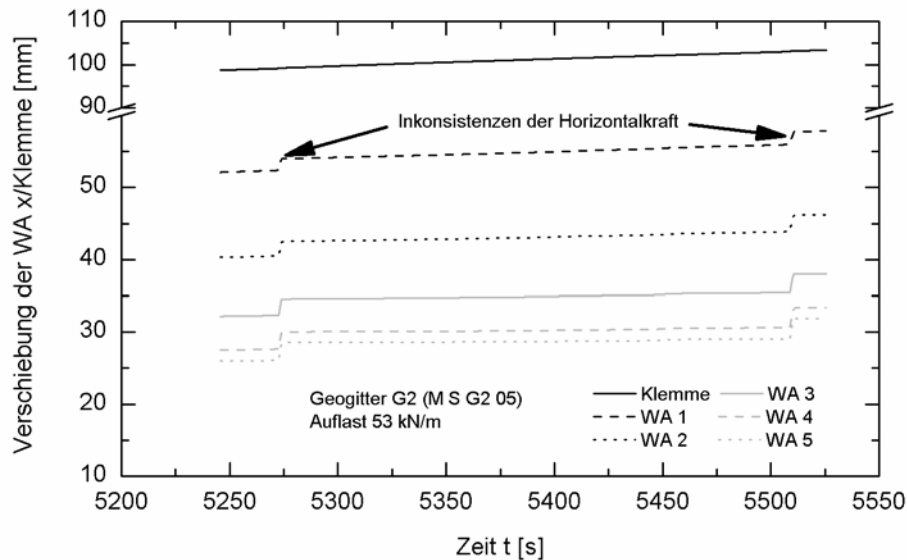


Bild 4.16:
Inkonsistenzen der
Horizontalkraft in
Abhängigkeit der
Einbindelänge am
Beispiel des Geo-
gitters G2

Das Auftreten dieses Phänomens lässt sich wie folgt erklären: Die Horizontalbelastung der Probe führt zu Dehnungen und zu einer Lastabtragung über die Querstreben im vorderen Bereich. Wird die Reibung und insbesondere der Erdwiderstand vor den vorderen Querstreben überschritten, so kommt es zu einem „Durchrutschen“ der Probe mit einer Aktivierung der gesamten Einbindelänge. Dieser Effekt ist mit einer plötzlichen Abnahme der Horizontalkraft verbunden, da die Widerstandskomponenten reduziert sind (Bild 4.17). Während der Verschiebung wird der Erdstoff vor einer größeren Zahl von Querstreben komprimiert, so dass durch den sich erneut aufbauenden Erdwiderstand größere Kräfte abgetragen werden können. Während im Bereich der Messstelle WA 1 knapp 50 % der Gesamtverschiebungen im Peakbereich auf diese plötzlichen Verschiebungen zurückzuführen sind, ergibt sich im hinteren Bereich ein Anteil von 80 % (Bild 4.17), da sich die Materialdehnungen zwischen beiden Messstellen ausbilden und daher Messstelle WA 1 während der Phase des Kraft- bzw. Dehnungsaufbaus größere Verschiebungen erfährt.

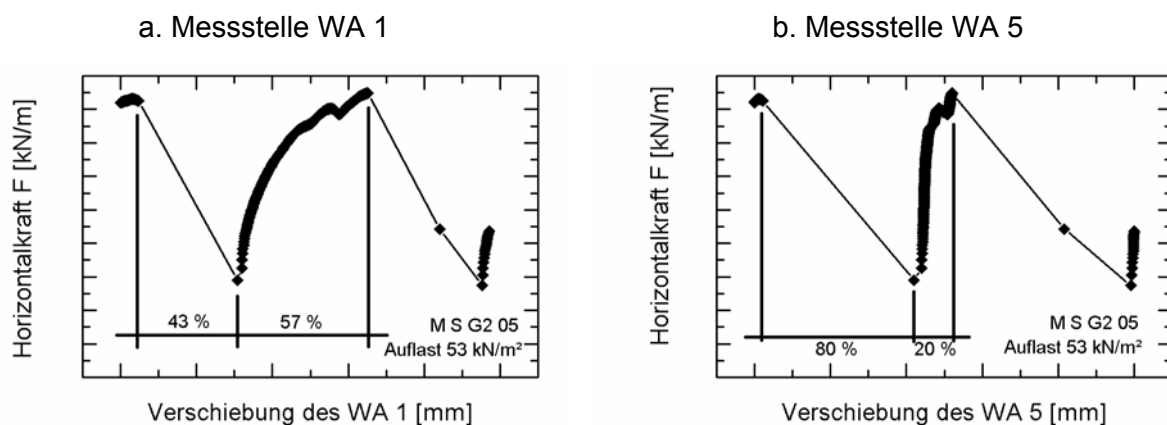


Bild 4.17: Detailuntersuchung eines Horizontalkraftsprunges bei Geogitter G2

Bei geringeren Lastniveaus ist der erforderliche Erdwiderstand noch gering bzw. Kräfte können zum Großteil über Reibungskomponenten abgetragen werden, so dass die Ausbildung der Inkonsistenzen erst bei höheren Lastniveaus eintritt. Ebenso ist die Bildung von Inkonsistenzen im Kies geringer, da der Interlockeffekt aufgrund des SDR-Parameters dominiert (Abschnitt 4.4.1). Ein plötzliches „Durchrutschen“ des Probenmaterials ist dabei weitgehend ausgeschlossen.

4.6.3 Verschiebungsentwicklung

Neben der maximalen Auszugskraft ist vor allem die Entwicklung der Verschiebungen im Probenmaterial von Bedeutung, da sie die Grundlage der Dehnungsermittlung und der Ermittlung des Lastabtragungsverhaltens darstellen. Von Relevanz ist daher die Klärung des Einflusses einzelner Parameter auf die Verschiebungsentwicklung: Hierbei sind insbesondere Geogitterart, Auflast, Lastniveau bzw. Ausnutzungsgrad und Erdstoff von Bedeutung. Die Verschiebungsaktivierung ist theoretisch vor allem von der tatsächlichen Dehnsteifigkeit des Bewehrungsmaterials abhängig. Diese wird maßgeblich von den angeführten Parametern beeinflusst (Abschnitte 4.3.1 und 4.5). Im Falle von $E \cdot A \rightarrow \infty$ liegt eine Starrkörperverschiebung mit gleichbleibenden Verschiebungsinkrementen über die gesamte Einbindelänge vor (Bild 4.18). Mit abnehmender Dehnsteifigkeit setzen sich Verschiebungen im vorderen Bereich der Einbindelänge nur noch zu einem bestimmten Prozentsatz in den hinteren Bereich fort (Bild 4.19).

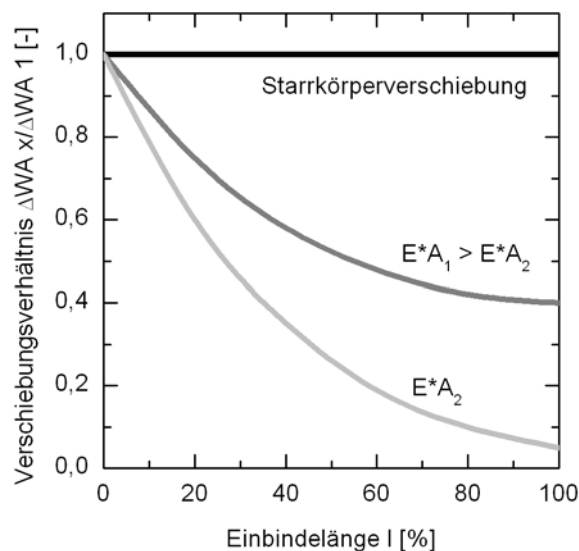


Bild 4.18: Einfluss der Materialsteifigkeit auf die Verschiebungsentwicklung

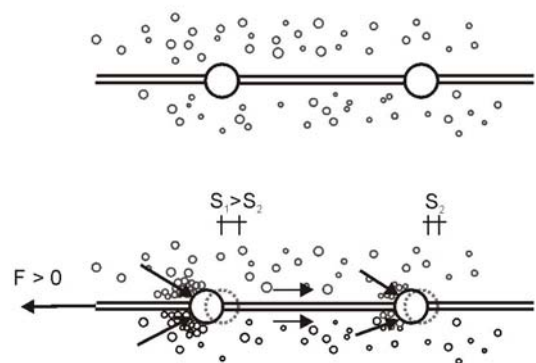


Bild 4.19: Lastabtragungsmodell für den statischen Modellversuch

In den folgenden Darstellungen wird die Verschiebung über die Einbindelänge des Probenmaterials auf die erste instrumentierte Querstrebe (WA 1) bezogen. Geogitter G2 wird dabei gleichmäßig über die Einbindelänge aktiviert, so dass hintere Bereiche schneller größere

Verschiebungen erhalten als vordere (Bild 4.20). Im Geogitter G1 kommt es hingegen vor allem in der vorderen Hälfte zu erheblichen Materialdehnungen, da hintere Querstreben weniger als 30 % der Verschiebungen von WA 1 aufweisen. Dieses Verhalten ist in der gegenüber Geogitter G2 etwa halbierten Dehnsteifigkeit begründet (Tabelle 3.2).

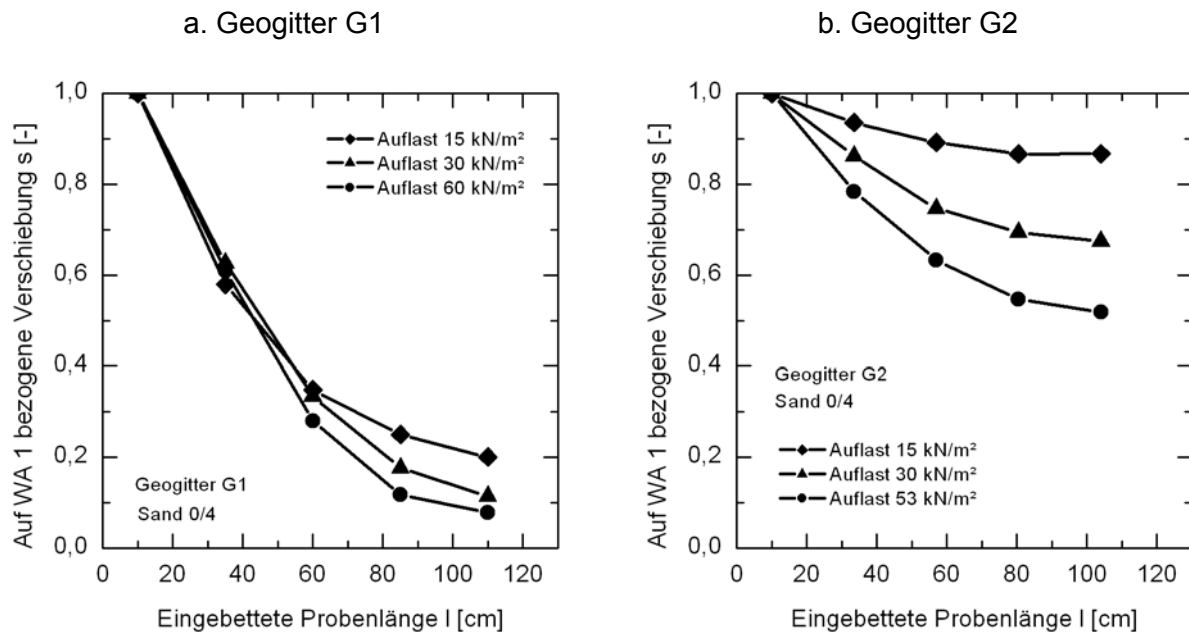


Bild 4.20: Entwicklung des Verschiebungsverhältnisses mit der Einbindelänge in Abhängigkeit der Auflast

Die auf WA 1 bezogene Verschiebung an WA 2 und 3 ist bei Geogitter G1 weitgehend auflastunabhängig, während hintere Bereiche bei geringen Auflasten früher aktiviert werden. Durch den geringen Querstrebenabstand und die große Dehnbarkeit des Materials bilden sich im vorderen Bereich schnell gestörte Bodenzonen, die sich mit steigender Auflast schnell nach hinten fortsetzen. Daher können hintere Bereiche bis zum Erreichen des Peaks gar nicht voll aktiviert werden. Geogitter G2 zeigt bei geringen Auflasten eine Tendenz zu einer Starrkörperverschiebung. Aufgrund des großen Querstrebenabstandes ist bei Geogitter G2 auch bei großen Verschiebungen nicht mit einer nennenswerten Störung der Bodenzonen vor den Querstreben zu rechnen, so dass größere Horizontalkräfte im Bewehrungsmaterial bei höheren Auflasten auch direkt zu größeren Dehnungen führen.

Bei geringem Ausnutzungsgrad (bezogen auf F_p) werden die eingeleiteten Horizontalkräfte zunächst im vorderen Bereich abgetragen. Mit steigendem Ausnutzungsgrad werden Kräfte und Dehnungen in hintere Bereiche geführt (Bild 4.21). Ein Ausnutzungsgrad von 100 % wird erreicht, wenn das Integral der Lastabtragung über die gesamte Einbindelänge ein Maximum erreicht. Dies ist bei Geogitter G1 bereits bei geringfügigen Verschiebungen des hinteren

Endes der Fall, da sich durch die Dehnungen vordere Bereiche schon in Bruchzonen befinden und dort die Lastabtragungskapazität bereits abnimmt.

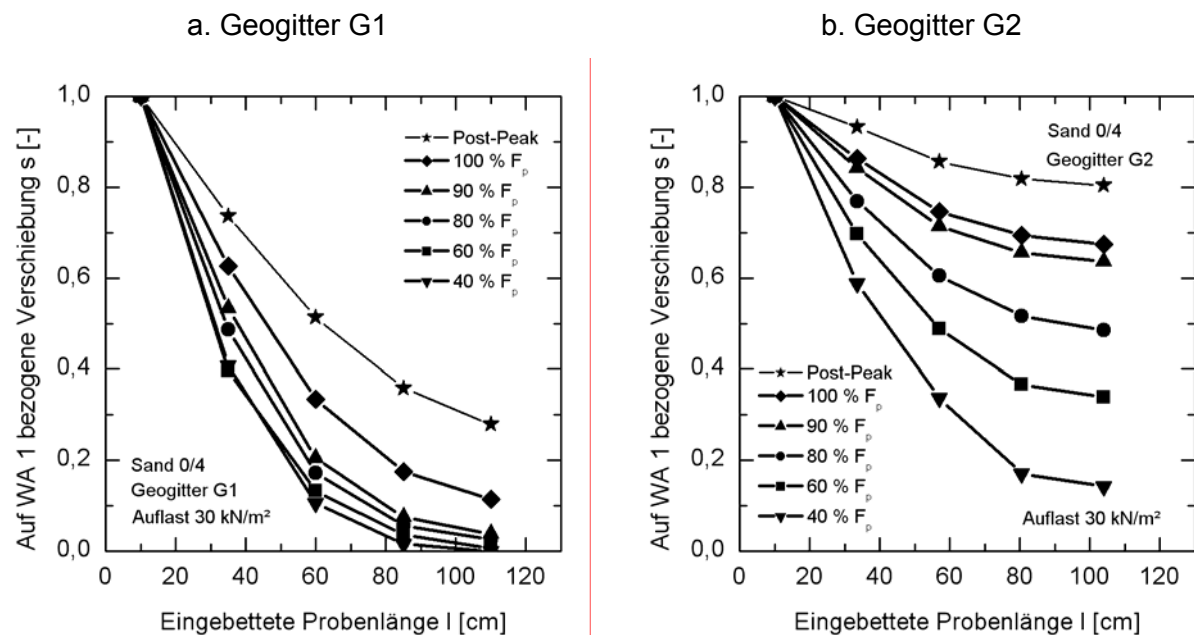


Bild 4.21: Entwicklung des Verschiebungsverhältnisses mit der Einbindelänge in Abhängigkeit der aufgetragenen Horizontalkraft für einen Sand 0/4

Der Einfluss des Erdstoffes auf die Verschiebungsentwicklung ist bei den untersuchten Materialien marginal. Die Verschiebungsentwicklung in Sand und Kies ist vergleichbar (Anhang D.2).

4.6.4 Ermittlung der Materialdehnungen

Die Materialdehnungen stellen einen Indikator für die Kraftentwicklung im Bewehrungsmaterial dar. Über den Verlauf der Kräfte mit der Einbindelänge können Rückschlüsse auf das Lastabtragungsverhalten und die Lastabtragungsmechanismen gezogen werden. Nach Farrag et al. (1993) sind die aus den Verschiebungen unterschiedlicher Messpunkte berechneten Dehnungen gut mit aus applizierten Dehnungsmessstreifen errechneten Dehnungen vergleichbar, so dass auf die aufwändige DMS-Applizierung verzichtet wird, da die Dehnungsermittlung im Rahmen dieser Untersuchungen nicht das primäre Untersuchungsziel darstellt.

Nach den in Abschnitt 2.5.2 vorgestellten Erkenntnissen ist die Übertragung einer Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus In-Air-Versuchen auf In-Soil-Versuche für Geogittermaterialien legitim. Da eine nach EN ISO 10319 im Streifenzugversuch mit einer Dehnungsrate von 20 % je Minute ermittelte Spannungs-Dehnungs-Beziehung das Materialverhalten während des bis zu zwei Stunden dauernden weggesteuerten Auszugsversuches eventuell nicht adä-

quat abbildet, wurden eigene Spannungs-Dehnungs-Beziehungen mit der Belastungsgeschwindigkeit des weggesteuerten Auszugsversuches ermittelt (Bild 4.22). Dabei zeigen sich sehr gut reproduzierbare Ergebnisse.

In einzelnen Abschnitten des Probenmaterials lassen sich somit aus den Dehnungen und der Spannungs-Dehnungs-Beziehung Kräfte abschätzen (Ochiai et al., 1996) und damit Aussagen zur Lastabtragung in den Erdstoff treffen.

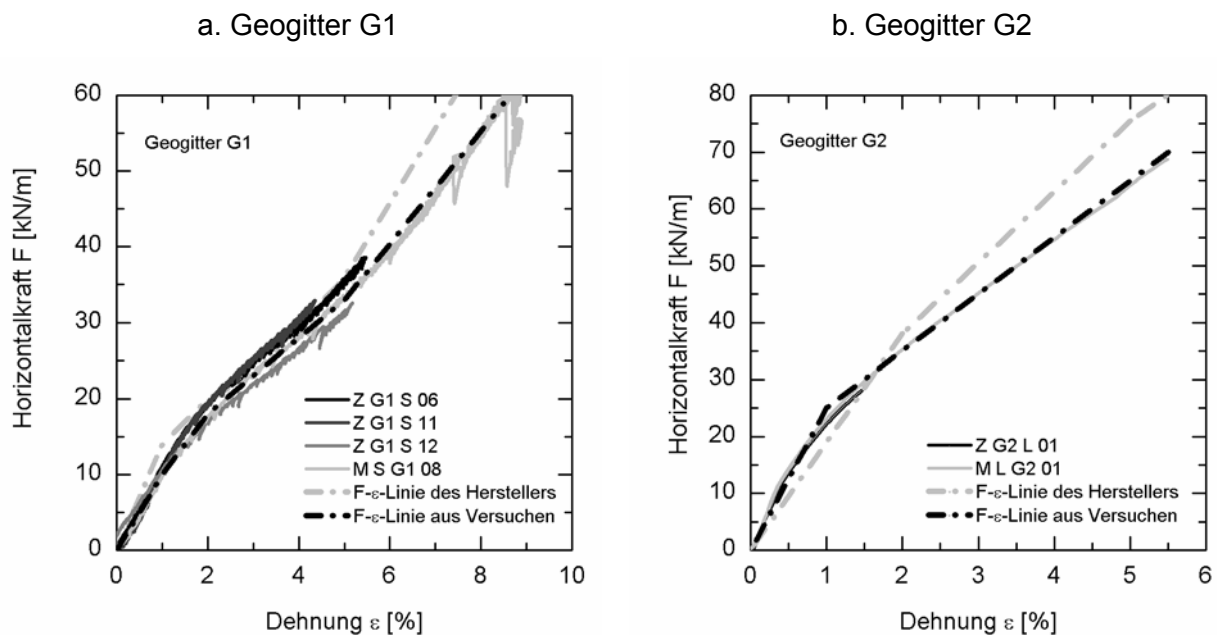


Bild 4.22: Kraft-Dehnungs-Beziehungen (freie Länge des Geokunststoffes), ermittelt mit der Auszugsgeschwindigkeit der statischen Modellversuche

Die Kraftentwicklung ist generell in beiden Geogittern vergleichbar. Die Kräfte in Geogitter G1 werden zunächst im vorderen Bereich abgetragen, während der hintere Abschnitt erst nach ca. 10 bis 20 mm Verschiebung an WA 1 Kräfte aufnimmt. Bei Geogitter G2 nimmt hingegen der hintere Abschnitt sehr schnell Kräfte auf. Insgesamt wird bei Geogitter G1 im Bereich bis zur ersten instrumentierten Querstrebe bereits Kraft abgetragen, während die Kraftabtragung bei Geogitter G2 in den mittleren und hinteren Bereich verlagert wird (Bild 4.23).

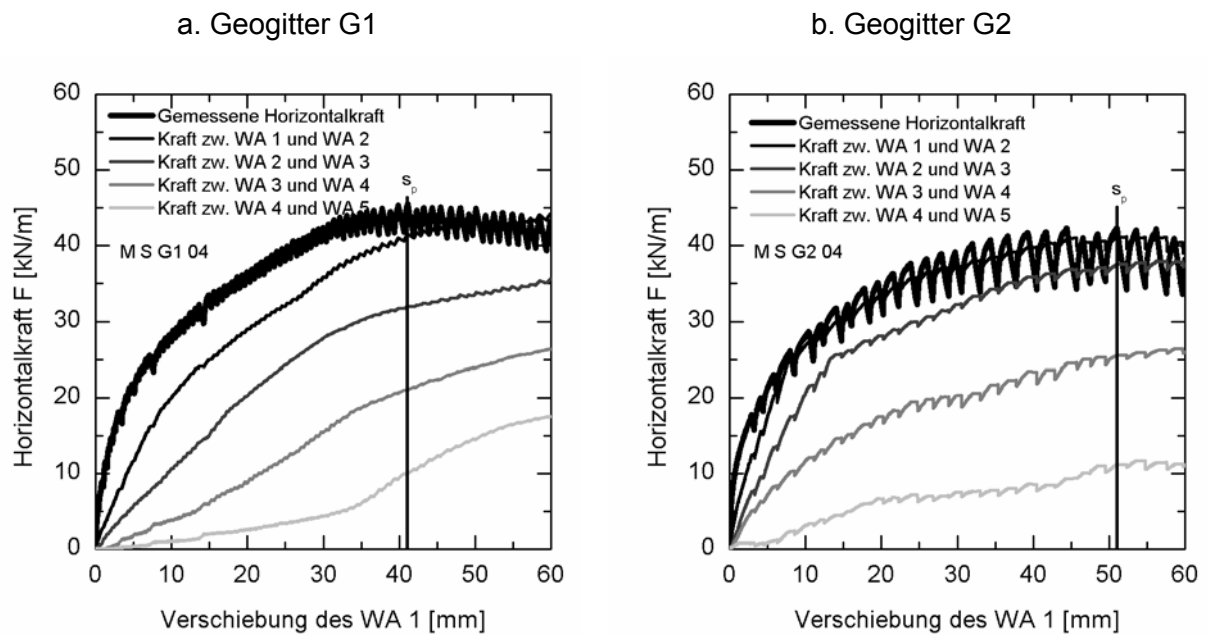


Bild 4.23: Gemessene und berechnete Horizontalkraftentwicklung an unterschiedlichen Positionen des eingebetteten Probenmaterials

Eine Erhöhung der Auflast führt insgesamt zu größeren Kräften in der Probe, wobei allerdings das Lastabtragungsverhalten über die Einbindelänge vergleichbar ist (Bild 4.24).

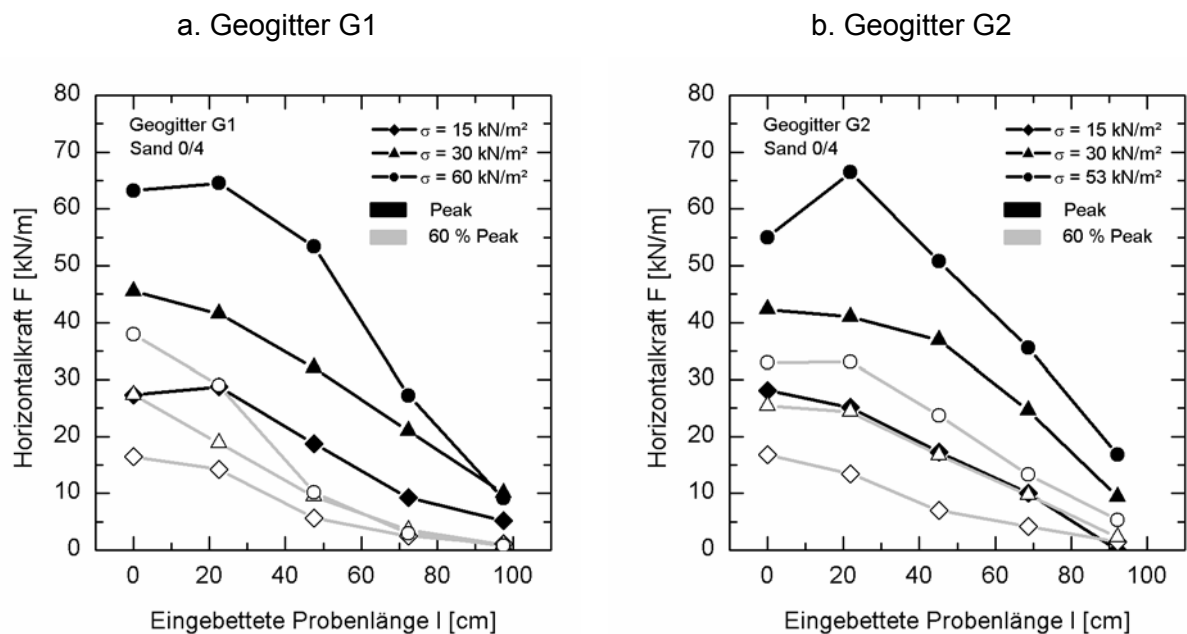


Bild 4.24: Lastabtragung über die eingebettete Probenlänge in Abhängigkeit des Lastniveaus und der Auflast

Das Lastabtragungsverhalten beider untersuchten Materialien gleicht sich im Peakbereich deutlich an. Mit Erhöhung des Lastniveaus werden Kräfte verstärkt in hintere Bereiche wei-

tergeleitet; dies gilt insbesondere für das Geogitter G1, bei dem sich vordere Bereich aufgrund des geringen Querstrebenabstandes bei den Peakverschiebungen bereits im Bruchzustand befinden müssen. Dadurch können in dieser Phase hintere Bereiche aktiviert werden, die bei Geogitter G2 bereits sehr viel früher an der Lastabtragung beteiligt werden. Bei Geogitter G2 ist es bei WA 1 im Peakbereich zu einer Fehlfunktion gekommen.

4.6.5 Lastabtragung über die Querstreben

Die Lastabtragung über Mechanismen vor den Querstreben wie Erdwiderstand und Interlock hat sich in den vorausgegangenen Auswertungen sowie in Untersuchungen von Ziegler und Timmers (2003), Palmeira (1987) und Chang et al. (1995) als sehr relevant herausgestellt (Abschnitt 2.4.3.2.4). Daher werden diese Mechanismen exemplarisch am gelegten Geogitter G3 untersucht.

Die maximale Auszugskraft F_p steigt weitgehend linear mit dem Querstrebenanteil an, wobei beim Übergang von 75 auf 100 % ein leichter Abfall der Zunahme zu erkennen ist (Bild 4.25 und Bild 4.26). Dies könnte aus einer gegenseitigen Beeinträchtigung der Querstreben in ihrer Lastabtragung resultieren. Palmeira (1987) klassifiziert dieses Verhalten durch einen „Interference Factor“ in Abhängigkeit von Querstrebenanzahl, -dicke sowie Abstand der Querstreben.

Die zunehmende Inkonsistenz der Horizontalkraft mit steigendem Querstrebenanteil bestätigt die Theorie des Abschnittes 4.6.2, wonach dieses Phänomen im Wesentlichen auf Lastabtragungsmechanismen vor den Querstreben zurückzuführen ist.

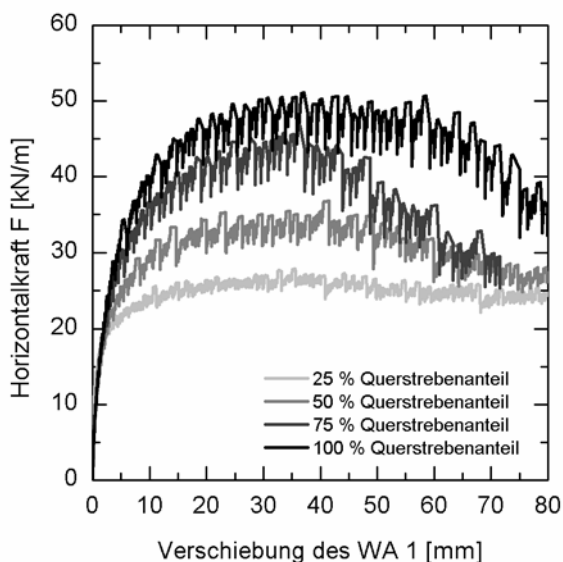


Bild 4.25: Entwicklung der Horizontalkraft in Abhängigkeit des Querstrebenanteils

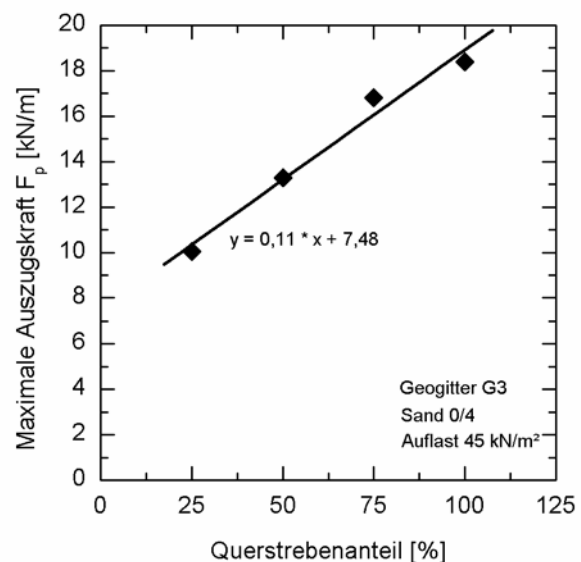


Bild 4.26: Maximale Auszugskraft in Abhängigkeit des Querstrebenanteils

4.7 Allgemeingültige Verformungsermittlung statischer Auszugsversuche

Um eine allgemeingültige Aussage über die Verformungen im zyklischen Modellversuch treffen zu können, ist die Bestimmung der Verschiebungen in der Phase 1 nach Bild 3.14 bis zum Erreichen des Oberlastniveaus erforderlich. Weiterhin können im statischen Modellversuch Erkenntnisse zum Verhalten im Gebrauchstauglichkeitsbereich ($F < F_p$) gewonnen werden.

Eine Allgemeingültigkeit unter Berücksichtigung aller möglichen Einflussparameter kann durch eine Normalisierung auf die maximale Auszugskraft F_p oder die Verschiebung zum Zeitpunkt der maximalen Auszugskraft s_p erfolgen, da die Kerneinflüsse in diese Kennwerte einfließen. Eine einseitige Normalisierung der Verschiebungen berücksichtigt dabei jedoch nicht die aus verschiedenen Auflastniveaus resultierende Streuung von F_p , während eine einseitige Normalisierung der Horizontalkräfte nicht die aus unterschiedlichen Steifigkeitsverhältnissen resultierende variable Lastaktivierung in Betracht zieht (Anhang D.3).

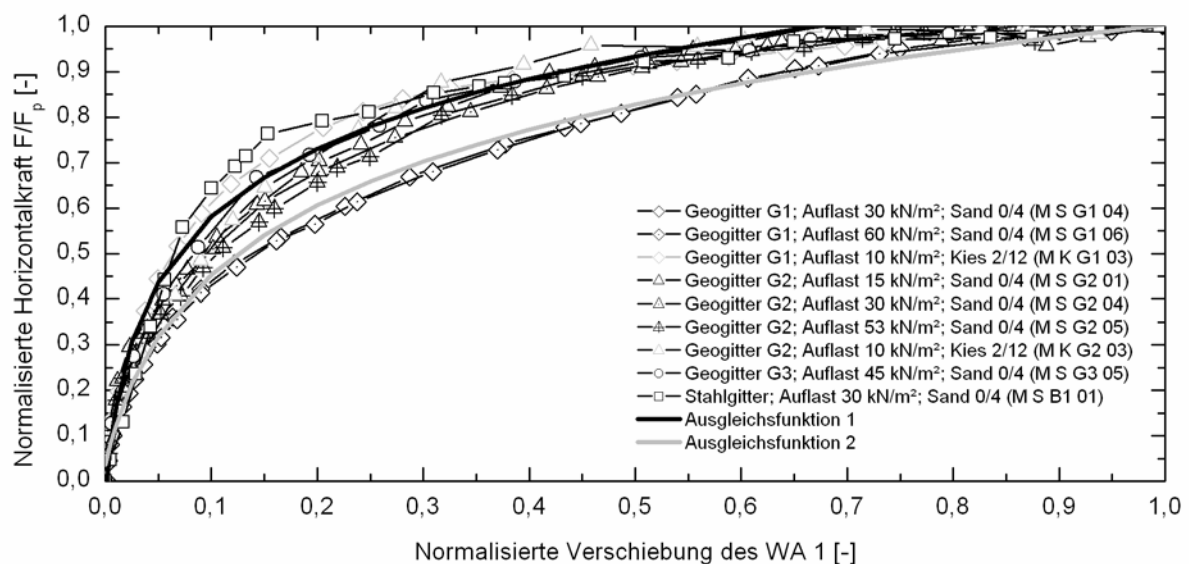


Bild 4.27: Normalisierte Entwicklung der Horizontalkraft in Abhängigkeit der Verschiebung für unterschiedliche Bewehrungsmaterialien

Eine zweiseitige Normalisierung auf F_p und s_p hingegen erzeugt vergleichbare Kurvenscharen (Bild 4.27), die durch eine Ausgleichsfunktion in guter Näherung allgemeingültig abgebildet werden können. Im Bereich der zweiten instrumentierten Querstrebe ist aufgrund des geringeren Einflusses der Steifigkeit sogar eine einheitlichere Tendenz auszumachen (Anhang D.3). Daher kann die Ausgleichsfunktion 1 ab der zweiten instrumentierten Querstrebe für alle untersuchten Materialien herangezogen werden.

Die dargestellten Ausgleichsfunktionen ermitteln sich zu:

$$\frac{F}{F_p} = \alpha_1 - \alpha_2 \cdot \ln\left(\frac{s}{s_p} + \alpha_3\right) \quad (4.1)$$

mit: $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ Regressionskoeffizienten für die statische Verschiebungsberechnung

Durch Umstellung dieser Gleichung kann bei bekannten Kennwerten F_p und s_p zu jedem Kraftniveau F eine Abschätzung der Verschiebung vorgenommen werden.

$$s_i(F) = \left(e^{\frac{\alpha_1 - \frac{F}{F_p}}{\alpha_2} - \alpha_3} \right) \cdot s_p \quad (4.2)$$

Wesentliche Einflussfaktoren für s_p und F_p sind in der Tabelle 4.4 zusammengefasst.

Tabelle 4.2: Regressionskoeffizienten für Verschiebung an Messstelle WA 1

Regressionskoeffizient	Geogitter G1, Sand 0/4	Alle weiteren untersuchten Kombinationen
	Ausgleichsfunktion 2	Ausgleichsfunktion 1
α_1	0,997	1,088
α_2	-0,163	-0,227
α_3	0,026	0,007

4.8 Zusammenstellung der Referenzversuche

Für die Verwendung weggesteuerter Modellversuche als Referenzversuche für die zyklischen Modellversuche ist die Kenntnis von F_p sowie s_p erforderlich. Soll ein Verschiebungsvergleich nicht nur an der ersten instrumentierten Querstrebe, sondern auch noch an weiteren Messstellen erfolgen, so ist die Kenntnis dieser Verschiebungen ebenfalls notwendig. Die Auftragung des Horizontalkraftverlaufes gegen die Verschiebung erleichtert die Beurteilung der angegebenen Kennwerte. Materialspezifisch können sich vergleichbare Horizontalkräfte über einen längeren Verschiebungsweg ausbilden, ohne dass es zu einem nennenswerten Abfall der Horizontalkraft kommt. Dieses Kraftniveau wird als Sattelniveau bezeichnet. Auf der sicheren Seite liegend ist der erste Peak eines Sattelniveaus als maximale Auszugskraft zu definieren.

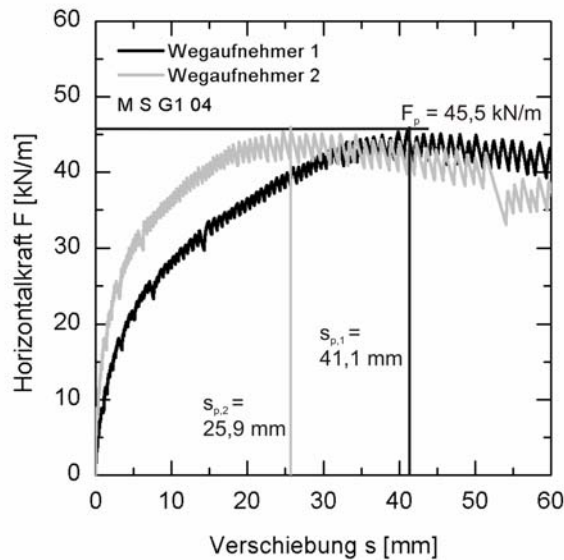


Bild 4.28: Exemplarische Darstellung der wesentlichen Informationen des Referenzversuches M S G1 04

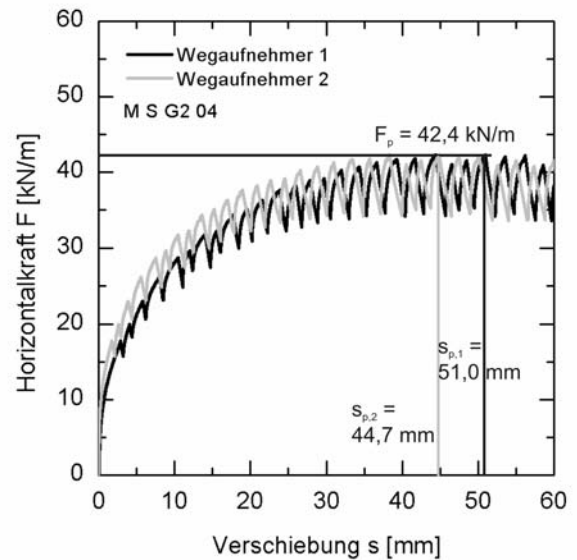


Bild 4.29: Exemplarische Darstellung der wesentlichen Informationen des Referenzversuches M S G2 04

Ein Vergleich der Verschiebungen erfolgt an Wegaufnehmer 1, da die relevanten Verschiebungen hier am größten und daher für den Nachweis maßgebend sind. Des Weiteren liegen hier deutlich größere Absolutwerte vor, wodurch der Einfluss von Messfehlern minimiert werden kann. Die Konsistenz des Verfahrens wird durch zusätzliche Überprüfung an Wegaufnehmer 2 nachgewiesen.

Tabelle 4.3: Kenndaten der statischen Referenzversuche

Bewehrungs- material	Erdstoff	Auflast [kN/m ²]	Einbinde- länge [m]	Querstre- benanteil [%]	s _{p,1} [mm]	s _{p,2} [mm]	F _p [kN/m]	Versuchs- nummer
Gewebtes	Sand 0/4	30	1,17	100	41,1	25,9	45,5	M S G1 04
Geogitter G1	Kies 2/12	10	1,17	100	46,0	28,8	54,4	M K G1 03
Gestrecktes Geogitter G2	Sand 0/4	30	0,95	100	47,4	45,3	30,1	M S G2 03
			1,15	100	51,0	44,7	42,4	M S G2 04
	Kies 2/12	53	1,15	100	56,0	43,9	55,0	M S G2 05
		10	1,15	100	37,2	28,7	51,1	M K G2 03
Gelegtes Geogitter G3	Sand 0/4	45	1,27	50	40,8	37,8	36,8	M S G3 03
			1,27	100	39,9	35,8	51,1	M S G3 05
Stahlgitter	Sand 0/4	30	1,08	100	27,9	--	37,7	M S B1 01
Stahlblech	Sand 0/4	150	1,25	--	2,4*	--	75,6	M S S1 01

*: Die dargestellte Verschiebung wird an der Klemme gemessen.

Im Anhang D.4 sind alle verwendeten statischen Referenzversuche zusammengestellt worden.

4.9 Erkenntnisse aus den statischen Versuchsreihen

In Kapitel 4 sind wesentliche Parameter bezüglich ihres Einflusses auf das Lastabtragungsverhalten untersucht worden. Die Signifikanz einzelner Kennwerte in Bezug auf die maximale Auszugskraft F_p und die Verschiebung s_p zum Zeitpunkt der maximalen Auszugskraft ist im Hinblick auf die zyklischen Modellversuche qualitativ in einer Matrix bewertet worden (Tabelle 4.4). Dabei deutet (+++) auf eine starke Relevanz und (--) auf eine geringe Relevanz hin. Es zeigte sich im Regelfall ein signifikanter Einfluss der Parametervariation auf F_p als auf s_p . Die Darstellung eignet sich nicht vorbehaltlos zu einer verallgemeinerten Anwendung bezüglich der untersuchten Tendenzen.

Tabelle 4.4: Klassifizierung der Relevanz wesentlicher Einflussparameter des statischen Modellversuches

	Maximale Auszugskraft F_p	Verschiebung s_p
	[kN/m]	[mm]
Bewehrungsmaterial	-- (Gitterstrukturen)	+
Einbindelänge der Bewehrung	++	++
Erdstoff	+++	k.A.
Einbaudichte des Erdstoffes	++	k.A.
Auflast	++	+
Querstrebenanteil	++	--

Da bei den zyklischen Modellversuchen weitere Parameter hinzukommen, ist eine Einschränkung der zu variierenden Kennwerte erforderlich. Eine Festlegung der Dichte im hohen Bereich erscheint aufgrund der Praxisanforderungen sinnvoll. Die Parameter Einbindelänge und Auflast fließen über eine Normalisierung auf den statischen Referenzversuch ein, müssen jedoch exemplarisch auch an zyklischen Modellversuchen überprüft werden. Die Kennwerte Bewehrungsmaterial und Erdstoff werden auch in den zyklischen Modellversuchen variiert, da sie wesentlich für das Lastabtragungsverhalten verantwortlich sind.

Bei der Analyse des Lastabtragungsverhaltens wurde gezeigt, dass eine Abschätzung der Kraftentwicklung im Bewehrungsmaterial über eine Kraft-Dehnungs-Beziehung möglich ist. Es wurde nachgewiesen, dass der wesentliche Lastabtrag bei Gitterstrukturen über Mecha-

nismen vor den Querstreben wie passiven Erdwiderstand und Interlock-Effekte erfolgt. Dabei sind die bezogene Steifigkeit des Bewehrungsmaterials in Abhängigkeit von Auflast, Dichte und Einbindelänge sowie Geometrieparameter und die Kornverteilung des Erdstoffes von herausragender Bedeutung.

5 Ergebnisse der zyklischen Modellversuche

5.1 Einführung

Im zweiten Abschnitt des Untersuchungsprogramms sind 81 zyklische Modellversuche durchgeführt worden, bei denen die statischen Parameter Erdstoff, Bewehrungsmaterial, Auflast und Einbindelänge sowie die zyklischen Parameter Belastungsniveau, Amplitude und Frequenz variiert worden sind. Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt dabei auf der Zyklik, während bereits in Kapitel 4 ausgewertete Parameter nur kurz aufgegriffen werden. Eine Detailübersicht aller ausgeführten Versuche ist dem Anhang C.4 zu entnehmen.

Die Betrachtung der zyklischen Modellversuche erfolgt im Wesentlichen bezüglich ihrer Verschiebungsentwicklung. Dazu werden zunächst geeignete Auswertungsmethoden vorgestellt und die Auswirkungen der unterschiedlichen Parameter auf die Verschiebungen und die Veränderung der Verschiebungen (Inkremente) ausgewertet.

Eine umfassende Analyse der Materialaktivierung und der Lastabtragung im zyklischen Modellversuch wird exemplarisch im Abschnitt 5.8 unternommen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Evaluierung von Unterschieden zum statischen Materialverhalten sowie auf der Entwicklung von Theorien zur Erklärung der analysierten Phänomene.

5.2 Generelle Datendarstellung

5.2.1 Datenaufbereitung

Hohe Aufzeichnungsfrequenzen der Messdaten zur Analyse einzelner Lastspiele führen zu einer sehr hohen Datendichte der Rohdaten (Stufe 1). Zur Datenreduktion ist ein vierstufiges Datenmodell entwickelt worden, mit dem die relevanten Daten für jede Auswertung in der erforderlichen Qualität bereitgestellt werden können (Tabelle 5.1).

In der Stufe 2 erfolgt eine Extrahierung der Daten an den Stellen der Horizontalkraftmaxima und –minima. Diese Daten werden in der Stufe 3 zur Ausgleichung geringfügiger Schwankungen mit einer Mittelwertfilterung bearbeitet. Die gewonnenen Werte werden zur Ermittlung von Verschiebungsinkonsistenzen (Bild 5.4) und für Auswertungen an einem bestimmten Lastspiel verwendet. In Stufe 4 erfolgt eine erhebliche Datenkomprimierung durch Mittelwertfilterung über eine große Anzahl von Lastspielen, wodurch Inkonsistenzen weitgehend eliminiert werden. Die Mittelwertfilterung ist dabei lastspielabhängig aufgebaut, um die signifikanteren Veränderungen im unteren Lastspielbereich realitätsnah abzubilden. Die Ursachen der Inkonsistenzen sind bereits in Abschnitt 4.6.2 dargelegt worden. Sie beeinflussen die verformungsbasierte Auswertung der zyklischen Modellversuche und müssen daher adäquat berücksichtigt werden. Entsprechende Darstellungen dienen zur Visualisierung einzelner Versuche sowie dem direkten Versuchsvergleich.

Tabelle 5.1: Stufen des verwendeten Datenmodells

Stufe	Datenbezeichnung	Datendichte
1	Rohdaten	sehr hoch
2	Grenzwertextrahierung	hoch
3	Mittelwertfilterung	hoch
4	Datenkomprimierung	niedrig

Detaillierte Angaben zur Datenaufbereitung und zum mathematischen Vorgehen sind dem Anhang E.1 zu entnehmen.

5.2.2 Darstellungsform

Als Kerninformation ist einem zyklischen Modellversuch eine Aussage über das Verformungsverhalten bei der verwendeten Kombination von Versuchsparametern zu entnehmen. Grundlage wesentlicher Auswerte- und Darstellungsmethoden sind daher die Verschiebungen und ihre Entwicklung im vorderen Probenbereich. Der vordere Probenbereich ist von besonderer Relevanz, da dort die größten Verschiebungen auftreten und es sich um den Bereich handelt, der sich im Verankerungsbereich direkt an die Gleitfläche anschließt und daher die Verformungen des Gesamtsystems wesentlich beeinflusst.

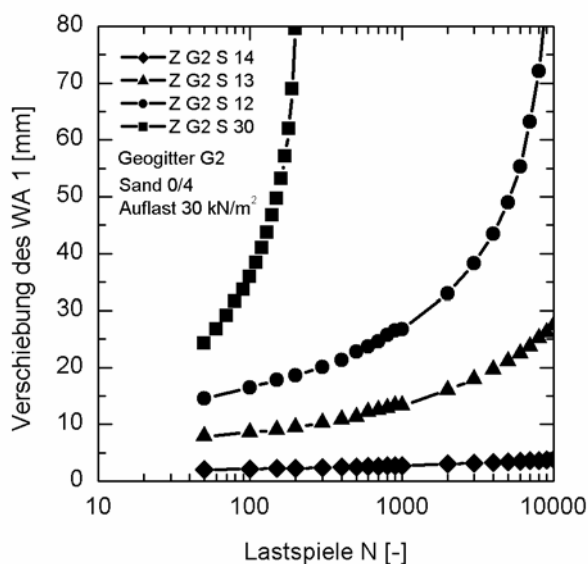


Bild 5.1: Verschiebungen des Geogitters G2 bei unterschiedlichen Lastkombinationen

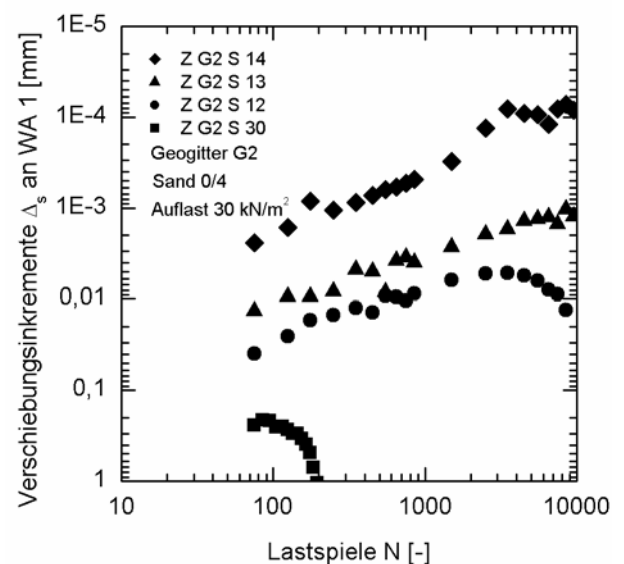


Bild 5.2: Verschiebungsinkremente des Geogitters G2 bei unterschiedlichen Lastkombinationen

Zwei generelle Darstellungsformen für Einzelversuche werden in Bild 5.1 und Bild 5.2 aufgezeigt. Bei der Auftragung von Verschiebungen gegen die Lastspielzahl ist das Verformungsverhalten des Probenmaterials direkt abschätzbar, während die Darstellung von Verschie-

bungsinkrementen gegen die Lastspielzahl eine genauere Beurteilung des Materialverhaltens hinsichtlich seiner Stabilität ermöglicht. Nähere Angaben zu den Darstellungsarten und ihren Aussagemöglichkeiten sind dem Anhang E.1 zu entnehmen.

Eine schnelle Zunahme der Verschiebungen deutet auf ein instabiles Verhalten hin, das in einem Versagenszustand enden kann. Davon ist insbesondere auch bei einer Zunahme der Verschiebungsinkremente mit jedem Lastspiel auszugehen (Versuch Z G2 S 30 in Bild 5.2). Bei einer absoluten Verschiebung von 80 mm ist ein zyklischer Versuch bei der untersuchten Einbindelänge von 115 cm abubrechen, da zu diesem Zeitpunkt eine eindeutige Aussage zum Materialverhalten möglich ist und sich die Reduzierung der Einbindelänge auf die Versuchsergebnisse auswirken kann. Eine langsame Verschiebungszunahme in Verbindung mit einer kontinuierlichen Abnahme der Verschiebungsinkremente (Versuche Z G2 S 13 und Z G2 S 14 in Bild 5.2) deuten auf ein stabiles Materialverhalten hin.

Eine konkrete Klassifizierung der Versuche bezüglich ihrer Stabilität wird in Abschnitt 6.5 vorgenommen.

5.2.3 Bezug auf den statischen Referenzversuch

In den folgenden Auswertungen erfolgt eine Normalisierung des Lastniveaus F_o und der Amplitude A auf den jeweiligen Wert des statischen Referenzversuches F_p zum Zeitpunkt der maximalen Horizontalkraft. Der statische Referenzversuch muss dazu mit identischem Bewehrungsmaterial, Erdstoff und Einbaudichte, Auflast und Einbindelänge durchgeführt worden sein.

Diese Normalisierung gewährleistet dabei einen Vergleich von Versuchen auch bei unterschiedlichen Randbedingungen und zyklischen Einwirkungsparametern und berücksichtigt die Auswirkungen der statischen Einwirkungsparameter ohne eine weitere Variation im zyklischen Modellversuch.

$$f_o = \frac{F_o}{F_p} \quad (5.1)$$

$$a = \frac{A}{F_p} = \frac{F_o - F_u}{F_p} \quad (5.2)$$

Ohne eine entsprechende Normalisierung wäre die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse erheblich eingeschränkt, da ein direkter Vergleich nur bei Versuchen mit identischen statischen Einwirkungsparametern möglich wäre.

Die Legitimität dieses Bezuges wird durch die Vergleichbarkeit von Ergebnissen unterschiedlicher Bewehrungsmaterialien und Erdstoffe in Kapitel 7 bestätigt.

5.3 Reproduktionsverhalten

Das Reproduktionsverhalten der Verschiebungsgrößen und –verläufe ist unabhängig von Erdstoff und Bewehrungsmaterial als gut zu bezeichnen (Bild 5.3). Auch im zyklischen Modellversuch sind Schwankungen der Ergebnisse vor allem auf geringfügige Unterschiede der Einbaudichte sowie auf Geometrieänderungen der Bewehrungsmaterialien zurückzuführen. Aufgrund der langanhaltenden zyklischen Belastung kommt es zu deutlicheren Einflüssen als beim statischen Modellversuch, die durch einen exakten Versuchseinbau zu minimieren sind.

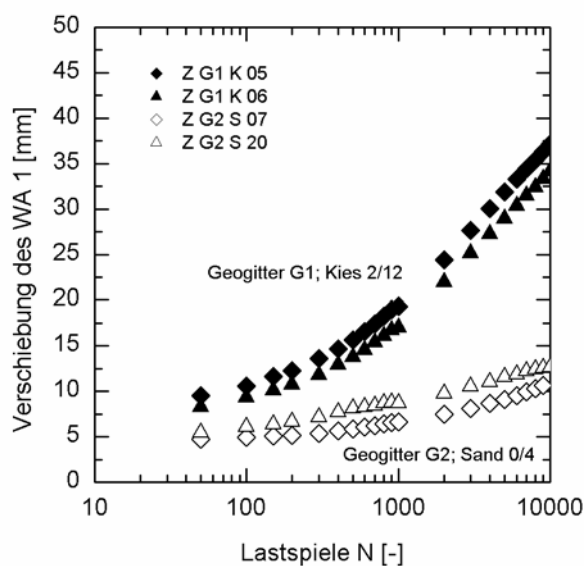


Bild 5.3:

Reproduktionsverhalten am Beispiel des Geogitters G1 im Kies und des Geogitters G2 im Sand

5.4 Einfluss des Bewehrungsmaterials

5.4.1 Art des Bewehrungsmaterials

In Bild 5.4 sind die Verschiebungsentwicklungen unterschiedlicher Bewehrungsmaterialien bei vergleichbaren normalisierten Lastkombinationen dargestellt.

Dabei bauen Gitterstrukturen die Verschiebungen progressiv auf, während es beim glatten Stahlblech nach sehr geringen Verschiebungen zu Beginn zu einer plötzlichen Verschiebungszunahme während einer sehr kleinen Anzahl von Lastspielen kommt. Dieses Verhalten ist mit den Auswertungen in Abschnitt 2.4.3.3.3 zu vergleichen. Die Lastabtragung erfolgt beim Stahlblech ausschließlich über die Reibungskomponente, so dass es bei Überschreitung einer Grenzreibung zu einem eindeutig bestimmbar Versagen des Materials kommt. Zusätzliche Komponenten vor den Querstreben tragen bei den Gitterstrukturen zu einer gleichmäßigeren Verschiebungsentwicklung bei, die allerdings auch die Klassifizierung in ein stabiles bzw. instabiles Verhalten erschwert.

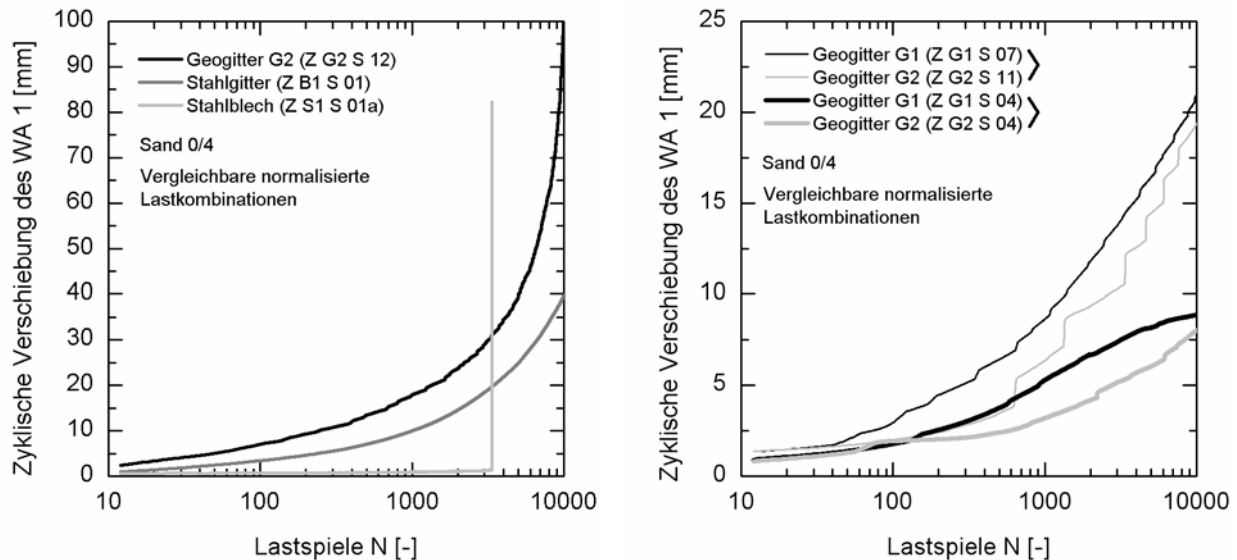
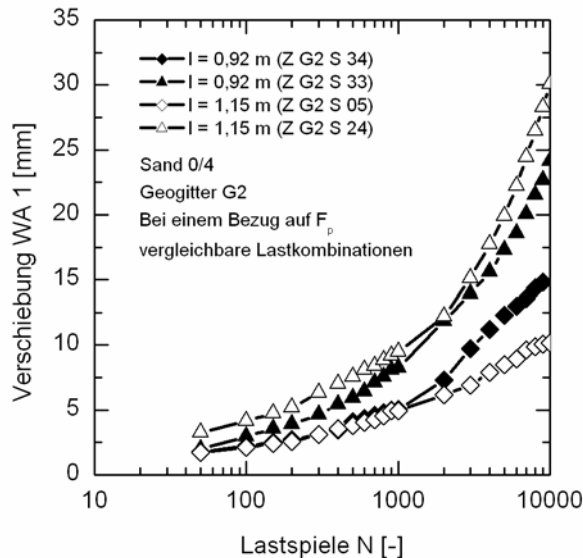


Bild 5.4: Verschiebungsentwicklung unterschiedlicher Bewehrungsmaterialien

Trotz unterschiedlicher Geometrien und Lastabtragungsmechanismen entwickeln sich die Verschiebungen bei zwei untersuchten Geogittermaterialien vergleichbar, wobei sich die Verschiebungen bei Geogitter G1 im Anfangsbereich schneller aufbauen. Dies kann auf die größeren Strukturdehnungen dieses Materials zurückgeführt werden (Abschnitt 2.5.3). Die signifikanteren Inkonsistenzen des Geogitters G2 lassen sich mit der größeren Steifigkeit dieses Materials begründen (Abschnitt 4.6.2).

5.4.2 Einfluss der Einbindelänge

Der Einfluss der Einbindelänge wird exemplarisch am Beispiel des Geogitters G2 für Probenlängen von 0,92 m und 1,15 m bei vergleichbaren normalisierten Lastkombinationen im Sand 0/4 untersucht. In den statischen Untersuchungen ist eine materialunabhängige lineare Beziehung von F_p zur Einbindelänge und eine materialabhängige Entwicklung von s_p zur Einbindelänge mit geringen Differenzen bei Geogitter G2 ermittelt worden (Abschnitt 4.3.2).

**Bild 5.5:**

Einfluss der Einbindelänge auf die Verschiebungsentwicklung bei Geogitter G2 bei Lastkombinationen, die bezogen auf das jeweilige F_p vergleichbar sind

Daher zeigen die vorgestellten Verschiebungsentwicklungen von Versuchen unterschiedlicher Einbindelängen, die bezogen auf ihr jeweiliges F_p vergleichbare Eingangsparameter besitzen, auch ein weitgehend vergleichbares Verhalten der Probenmaterialien (Bild 5.5). Dies zeigt, dass eine Normalisierung der Ergebnisse von Versuchen unterschiedlicher Einbindelängen legitim ist. Die Verschiebungen von Versuch Z G2 S 34 fallen aufgrund einer geringfügig niedrigeren Auflast marginal größer aus.

5.5 Einfluss des Erdstoffes

Im Kies 2/12 sind bei identischem Auflastniveau und gleichen absoluten Belastungen deutlich geringere Verschiebungen als im Sand 0/4 zu beobachten. Dieses Phänomen ist vergleichbar mit den statischen Versuchserkenntnissen in Abschnitt 4.4.1.

Werden die Lastkombinationen jedoch auf den statischen Referenzversuch normalisiert, so ergeben sich bei vergleichbaren Lastkombinationen im Kies tendenziell größere Verschiebungen als im Sand. Das Interaktionsverhalten in Kies ist damit unter zyklischer Belastung geringfügig schlechter als in Sand.

Da die Lastabtragung im Kies zu einem Großteil über Interlockmechanismen vollzogen wird, ist zu vermuten, dass es durch die Lastspiele immer wieder zu Störungen dieses Mechanismus kommt. Die positive Verdichtungswirkung der Lastspiele im Sand kann beim verwendeten Kies nur in sehr abgeschwächter Form zum Tragen kommen.

Weitere Auswertungen zum Einfluss des Erdstoffes auf das Materialverhalten werden in Kapitel 6 dargestellt.

5.6 Einfluss der Auflast

Ausführliche Analysen zum Einfluss der Auflast auf das Materialverhalten sind bereits bei den statischen Modellversuchen (Kapitel 4) dargelegt worden. Diese Erkenntnisse fließen über eine Normalisierung auf den statischen Referenzversuch in die Auswertung ein.

Zu Verifizierungszwecken sind jedoch zwei Versuche mit einer erhöhten Auflast unter Verwendung des Geogitters G2 im Sand 0/4 durchgeführt worden. Dabei war ein geringerer Absolutbetrag der Verschiebungen gegenüber der geringeren Auflast zu beobachten.

Detailliertere Aussagen zum Einfluss der Auflast werden bei der allgemeingültigen Versuchsauswertung in Kapitel 6 getroffen.

5.7 Einfluss von Belastungsparametern

5.7.1 Einfluss des Lastniveaus

Da für die folgenden Auswertungen eine Vielzahl von Modellversuchen herangezogen werden muss, ist diese Untersuchung exemplarisch nur für Geogitter G2 im Sand 0/4 durchgeführt worden. Die Analysen in Kapitel 6 zeigen aber die Allgemeingültigkeit dieser Betrachtungen.

Bei konstanter Amplitude ist mit wachsendem Lastniveau f_0 eine deutliche Beschleunigung der Verschiebungsentwicklung über die Lastspielzahl auszumachen (Bild 5.6): Das Lastniveau ist demnach ein entscheidender Einflussparameter. Wird die zyklische Verschiebung nach 10.000 Lastspielen für verschiedene Amplitudengrößen a in Abhängigkeit des Lastniveaus f_0 aufgetragen, so ist ein deutlich überlinearer Verschiebungszuwachs mit steigendem Lastniveau zu erkennen (Bild 5.7). Jeder eingetragene Datenpunkt entspricht dabei einem zyklischen Modellversuch. Bei großen Amplituden kommt es zu einem deutlich schnelleren Anstieg der zyklischen Verschiebungen bei geringer Anhebung des Lastniveaus, da die Auslastung des Materials durch die Amplituden hier bereits sehr groß ist.

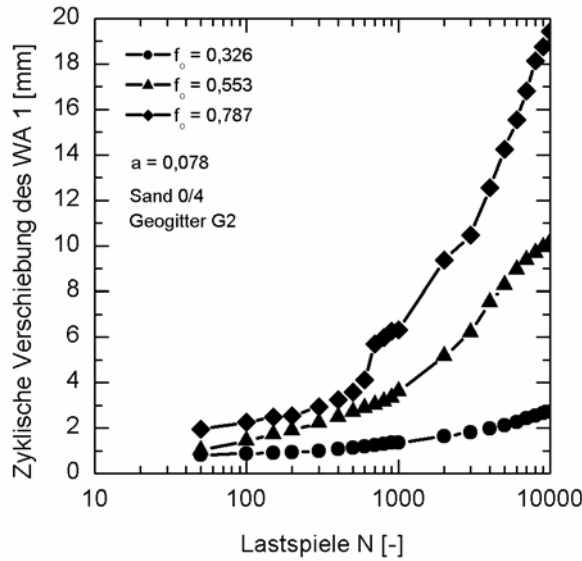


Bild 5.6: Verschiebungsentwicklung bei konstanter Amplitude und variablem Lastniveau

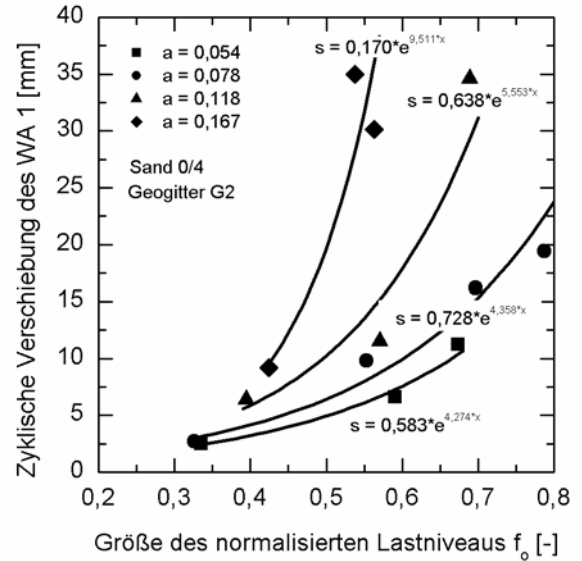


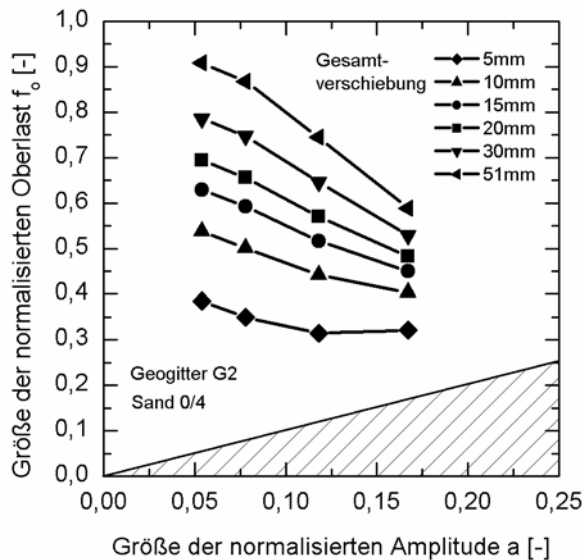
Bild 5.7: Verschiebungsentwicklung in Abhängigkeit der Amplitude und des Lastniveaus bei 10.000 Lastspielen

Die zyklischen Verschiebungen der Versuche mit gleicher Amplitude lassen sich in guter Näherung durch eine exponentielle Regression darstellen, so dass eine stufenlose Verschiebungsabschätzung in Abhängigkeit des Lastniveaus bei gegebener Amplitude ermöglicht wird. Eine allgemeingültige Abschätzung für weitere Amplituden ist allerdings nur durch Interpolation möglich.

$$s_{i,N}(F_0; A) = \left(e^{\frac{\alpha_1 \cdot \frac{F_0}{F_p}}{\alpha_2} - \alpha_3} \cdot s_{i,p} + \beta_1 \cdot e^{\beta_2 \cdot \frac{F_0}{F_p}} \right) \quad (5.3)$$

mit: β_1, β_2 Regressionskoeffizienten für den zyklischen Verschiebungsanteil

Die Ermittlung der Gesamtverschiebung des zyklischen Versuches nach 10.000 Lastspielen ist nach Gleichung (5.3) durch eine Kombination der Verschiebungen aus Phase 1 des Versuches (Abschnitt 4.7) und den ermittelten zyklischen Verschiebungen aus der Versuchsphase 2 für verschiedene Messstellen i möglich. Die Regressionskoeffizienten β_1 und β_2 sind dabei amplitudenabhängig dem Bild 5.7 zu entnehmen. Durch iteratives Lösen dieser Beziehung lassen sich Kombinationen aus a und f_0 ermitteln, die zu bestimmten Gesamtverschiebungen führen (Bild 5.8).

**Bild 5.8:**

Aus den Lastniveaus entwickelte Kurven für die Gesamtverschiebung des Geogitters G2 in Abhängigkeit von Lastniveau und Amplitude bei 10.000 Lastspielen

Die Gesamtverschiebungen liegen bei mittleren Lastniveaus bis $f_0 \sim 0,5$ und mittleren Amplituden bis $a \sim 0,15$ im Bereich unter 10 mm: Dieser Bereich geringster Verschiebungen bedarf keiner weitergehenden Analyse. Mit zunehmender Amplitude kommt es zu einem signifikanten Verschiebungsanstieg, so dass auch dieser Parameter einer eingehenden Untersuchung bedarf. Verschiebungszunahmen durch höhere Lastniveaus sind zum Teil auch auf größere Verformungen in der Phase 1 des zyklischen Modellversuches zurückzuführen.

Die schnelle Verschiebungszunahme bis zum Erreichen des Wertes s_p weist deutlich auf die Notwendigkeit einer umfangreichen Versuchsdurchführung in diesem kritischen Belastungsbereich hin.

5.7.2 Einfluss der Amplitude

Auch die Analyse des Amplitudeneinflusses auf die Verschiebungsentwicklung ist aufgrund der Notwendigkeit einer sehr großen Versuchsdatenbasis exemplarisch nur für das Geogitter G2 im Sand 0/4 durchgeführt worden.

Die Auswertung unterschiedlicher zyklischer Modellversuche bei konstantem Lastniveau f_0 zeigt eine deutliche Abhängigkeit der zyklischen Verschiebungsentwicklung von der Amplitudengröße (Bild 5.9): Es handelt sich hierbei um eine wesentliche Einflussgröße. Die Auswertung der Versuchsdaten für 10.000 Lastspiele zeigt dabei ebenfalls eine annähernd exponentielle Zunahme der zyklischen Verschiebung mit wachsender Amplitude a bei konstanten Lastniveaus f_0 (Bild 5.10). Auffällig ist die geringe Verschiebungszunahme mit steigender Amplitude bei $f_0 = 0,37$: Bei geringem Auslastungsgrad des Materials können offenbar größere Amplituden ohne deutliche Verschiebungserhöhung aufgenommen werden.

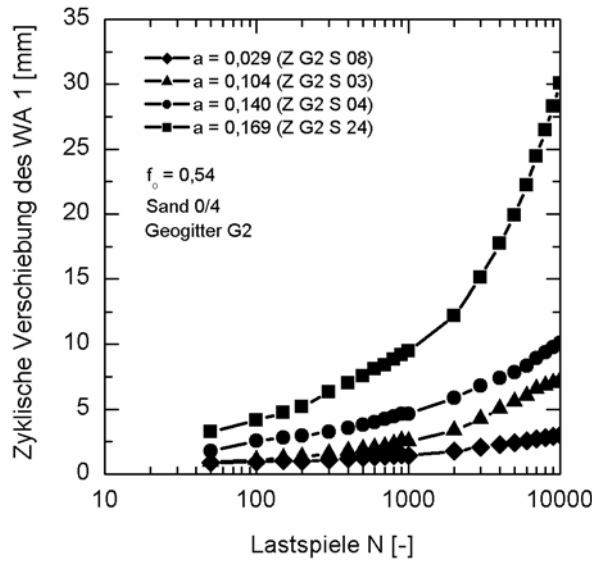


Bild 5.9: Verschiebungsentwicklung bei konstantem Lastniveau und variabler Amplitude

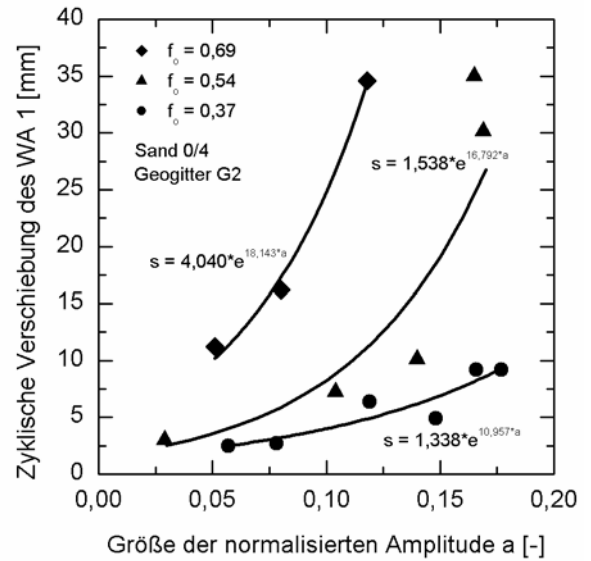


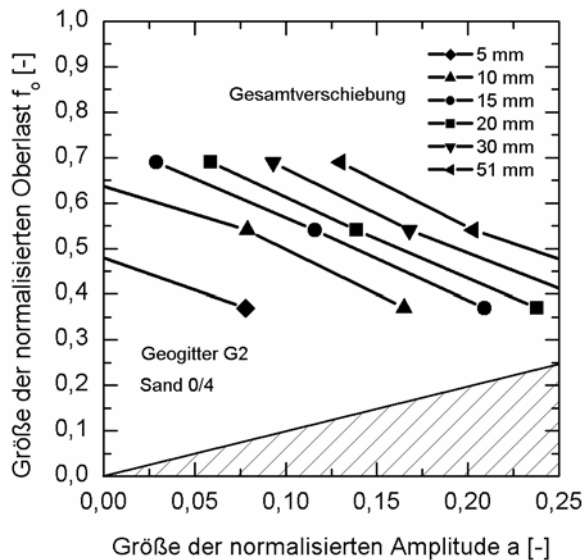
Bild 5.10: Verschiebungsentwicklung in Abhängigkeit der Amplitude und des Lastniveaus bei 10.000 Lastspielen

Für die ausgewerteten Lastniveaus kann die Gesamtverschiebung aus den Phasen 1 und 2 des zyklischen Modellversuches für beliebige Amplituden mit Gleichung (5.4) ermittelt werden. Die Regressionskoeffizienten β_1 und β_2 sind dem Bild 5.10 zu entnehmen. Bei Vorgabe beliebiger Gesamtverschiebungen kann durch Umstellung der Beziehung nach A für die untersuchten Lastniveaus f_0 eine zugehörige Amplitude ermittelt werden (Bild 5.11).

$$s_{i,N}(F_0; A) = \left(e^{\frac{\alpha_1 \cdot \frac{F_0}{F_p}}{\alpha_2} - \alpha_3} \right) \cdot s_{i,p} + \beta_1 \cdot e^{\beta_2 \cdot \frac{A}{F_p}} \quad (5.4)$$

Die Gesamtverschiebungen von Bild 5.11 sind mit denjenigen aus Bild 5.8 vergleichbar, wobei die erste Grafik aus der Variation des Lastniveaus und die zweite Grafik aus der Variation der Amplitude entwickelt worden ist. Geringfügige Unterschiede sind vor allem in den Randbereichen bei sehr großen und sehr kleinen Werten der variierten Parameter festzustellen. Diese beruhen auf unterschiedlichen Regressionen und Versuchsdaten, die für eine Auswertung herangezogen worden sind.

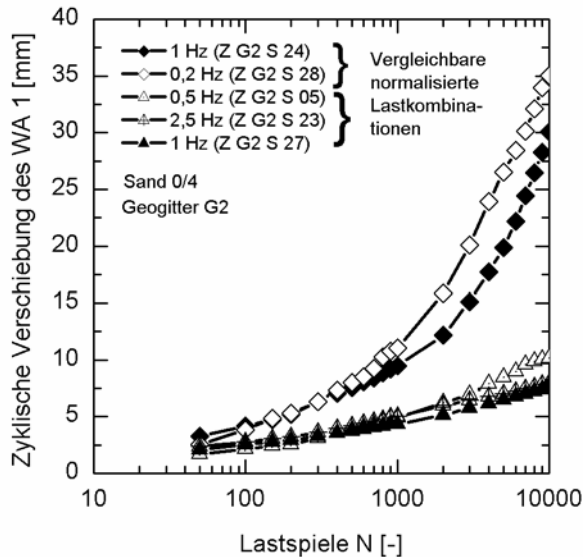
Als nachteilig erweist sich insbesondere die Limitierung auf festgelegte Last- und Amplitudenniveaus. Das Ziel muss daher die Entwicklung einer allgemeingültigen Verschiebungsbeziehung in Abhängigkeit der Kernparameter Lastniveau und Amplitude sein, die aus einer möglichst umfangreichen Datenbasis mit einer großen Variation der Einflussparameter ermittelt wird. Ein entsprechendes Konzept wird in Abschnitt 6.2 vorgestellt.

**Bild 5.11:**

Aus den Amplituden entwickelte Kurven für die Gesamtverschiebung des Geogitters G2 in Abhängigkeit von Lastniveau und Amplitude

5.7.3 Einfluss der Frequenz

Im Rahmen des Untersuchungsprogramms ist eine große Anzahl zyklischer Modellversuche mit Belastungsfrequenzen in einem Band von 0,1 bis 2,5 Hz durchgeführt worden. In Bild 5.12 wird die Entwicklung der zyklischen Verschiebungen exemplarisch für 5 Versuche aus zwei vergleichbaren Lastkombinationen aufgezeigt.

**Bild 5.12:**

Verschiebungsentwicklung in Abhängigkeit der Belastungsfrequenz

Dabei zeigt sich im Rahmen der Versuchsstreuungen kein signifikanter Einfluss der Belastungsfrequenz auf die zyklische Verschiebungsentwicklung. Diese Erkenntnis bestätigt die Analysen des Abschnittes 2.4.3.3.3.

Für die Auswertungen der zyklischen Modellversuche werden daher Versuchsergebnisse aller Belastungsfrequenzen zusammen ausgewertet und verglichen.

5.7.4 Einfluss der Lastspielzahl

Die Größe der zyklischen Verschiebung steigt mit der aufgetragenen Lastspielzahl. Dieser Parameter wird bei Regelversuchen auf $N = 10.000$ begrenzt, da bei Gittermaterialien keine plötzliche Änderung des Verhaltens zu erwarten ist und diese Lastspielzahl für die Analyse von Einflussfaktoren ausreicht (Abschnitt 3.5.3).

Zur Überprüfung einer Extrapolationsmöglichkeit wurden bei ausgewählten Versuchen höhere Lastspielzahlen aufgebracht (Bild 5.13). Es zeigt sich, dass der Einfluss der Lastspielzahl unter anderem vom Lastniveau, der Amplitude und der Bewehrungsart abhängt. Während die zyklischen Verschiebungen beim dargestellten Versuch a. von 10^4 bis 10^5 nur marginal zunehmen, also ein stabiles Verhalten vorliegt, ist die Zunahme bei Versuch b. – hervorgerufen durch deutliche Inkonsistenzen – stärker ausgeprägt. Eine Extrapolation der Daten um eine Zehnerpotenz ist daher nur bei genauer Analyse der Verschiebungsentwicklung und der Verschiebungsinkremente möglich. Ein praktikables Verfahren wird in Abschnitt 6.6 vorgestellt.

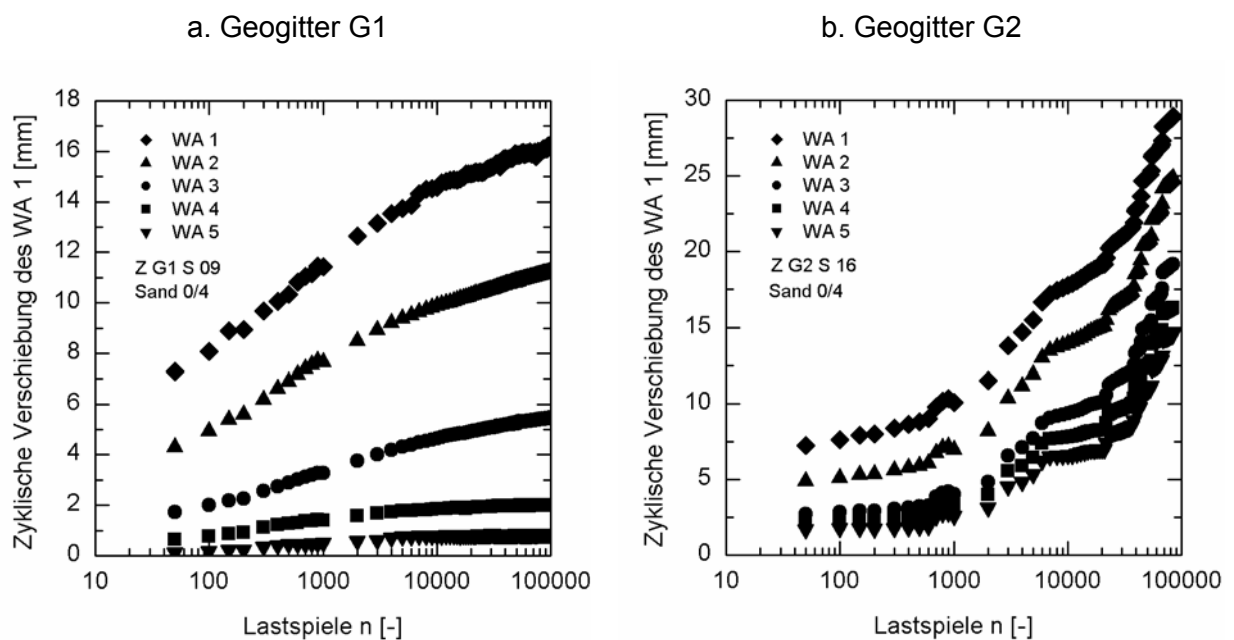


Bild 5.13: Verschiebungsentwicklung verschiedener Messstellen in Abhängigkeit der Lastspielzahl bei zyklischen Modellversuchen mit 100.000 Lastspielen

Für die Analyse des Parametereinflusses ist die Aufbringung von 10.000 Lastspielen ausreichend. Eine Extrapolation der Daten um eine Zehnerpotenz ist unter bestimmten Bedingungen möglich. Für Aussagen bei weitergehenden Lastspielzahlen sollten entsprechende Modellversuche mit höheren Lastspielzahlen durchgeführt werden.

5.8 Lastabtragungsverhalten der Bewehrungsmaterialien

5.8.1 Einführung

Im Abschnitt 5.8 wird eine detaillierte Analyse der Materialaktivierung und der Lastabtragung in den Phasen 2 und 3 des zyklischen Modellversuches durchgeführt (Bild 3.14). Die Zielstellung dabei ist die Evaluierung von Unterschieden und Gemeinsamkeiten zwischen zyklischem und statischem Materialverhalten sowie das Aufzeigen einer Theorie zur Erklärung der dargestellten Phänomene.

Die Thematik wird im Folgenden exemplarisch am Beispiel des Geogitters G1 dargestellt, da wesentliche Effekte aufgrund der geringeren Dehnsteifigkeit und der Möglichkeit einer Verschiebungsmessung in der freien Länge des Materials anschaulicher dargestellt werden können. Vergleichbare Auswertungen für das Geogitter G2 sind dem Anhang E.2 zu entnehmen.

5.8.2 Probenaktivierung

Eine Betrachtung der Verschiebungsentwicklung pro Lastspiel über die Einbindelänge und die Lastspielzahl ermöglicht Aussagen über die Tiefenwirkung der Belastung und die Art der Verschiebung.

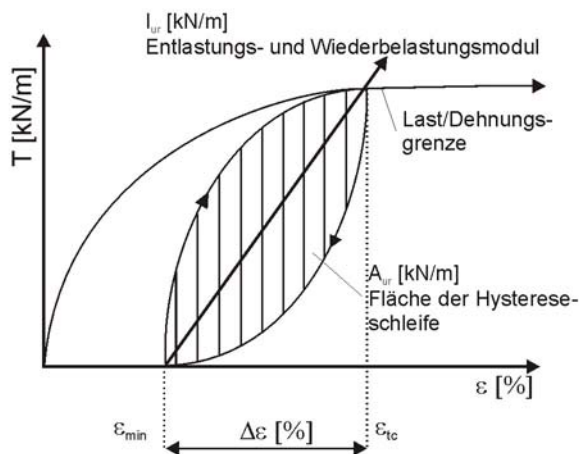


Bild 5.14:

Charakteristiken einer Hystereseschleife, nach Moraci und Montanelli (1997)

Als wichtige Parameter zur Charakterisierung der Steifigkeitsveränderungen während der Lastspieldaufbringung werden von Moraci und Montanelli (1997) die Fläche A_{ur} der Hystereseschleife bei visko-elastischen oder elasto-plastischen Stoffen sowie der Wiederbelastungsmodul I_{ur} bezeichnet (Bild 5.14). A_{ur} charakterisiert dabei die eingetragene Energie, die überwiegend in Wärme umgewandelt wird.

Die Verschiebungen des Beispielversuches setzen sich bei jedem Lastspiel aus einem plastischen und einem elastischen Anteil zusammen. Zu Beginn ist eine deutliche plastische Komponente auszumachen, die sich insbesondere in der vorderen Hälfte der eingebetteten Probe bemerkbar macht. Dieses Phänomen führt zu Beginn der Phase 2 zu signifikanten Verschiebungen des Probenmaterials. Im weiteren Verlauf der Phase 2 überwiegt insbesondere an Messstelle 1 und 2 der elastische Verschiebungsanteil, der durch eine Hystereseschleife mit wachsender Fläche A_{ur} gekennzeichnet ist.

Bei der Betrachtung von A_{ur} als Indikator für die eingebrachte Energie ist von einer Vergrößerung der durch elastisches Materialverhalten eingetragenen Energie auszugehen, während der plastische Anteil stetig abnimmt. Durch Verschiebungen in den ersten Lastspielen hat das Probenmaterial eine Lastabtragungskapazität erreicht, die im weiteren Verlauf der Phase 2 eine Abtragung der zyklischen Belastung bereits in der vorderen Probenhälfte ermöglicht. Die Auswertung des Geogitters G2 im Anhang E.2 deutet auf ein deutlich geringeres elastisches Potenzial hin.

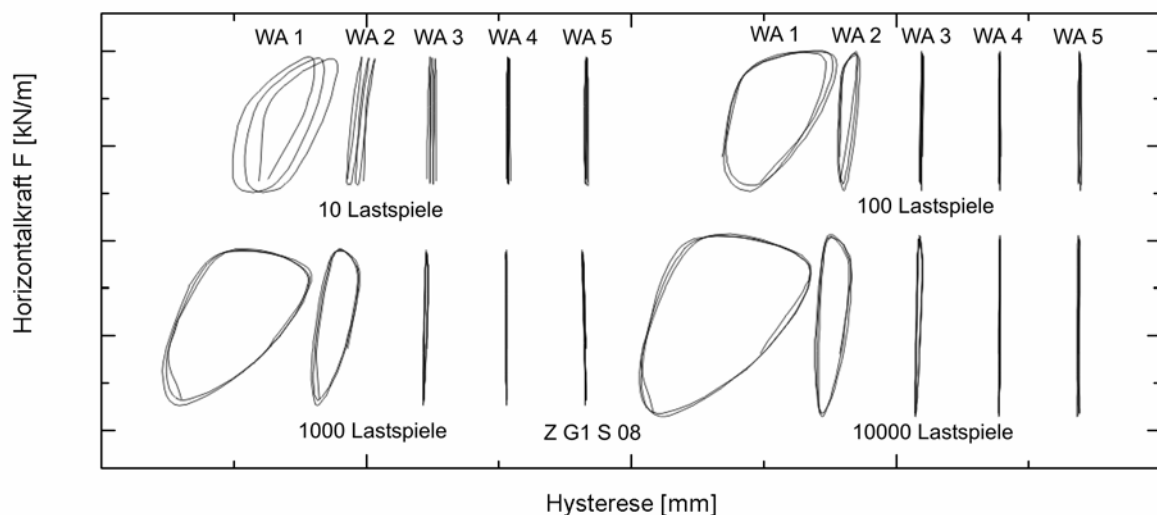


Bild 5.15: Hysteresen an fünf eingebetteten Verschiebungsmessstellen in Abhängigkeit der Lastspielzahl bei Geogitter G1

Auswertungen an Geogitter G2 bestätigen den deutlichen Einfluss der Amplitude auf A_{ur} und die Tiefenwirkung der Belastung (Anhang E.2). Diese Beobachtung bestätigt die bereits in Abschnitt 5.7 ermittelte Signifikanz dieses Parameters.

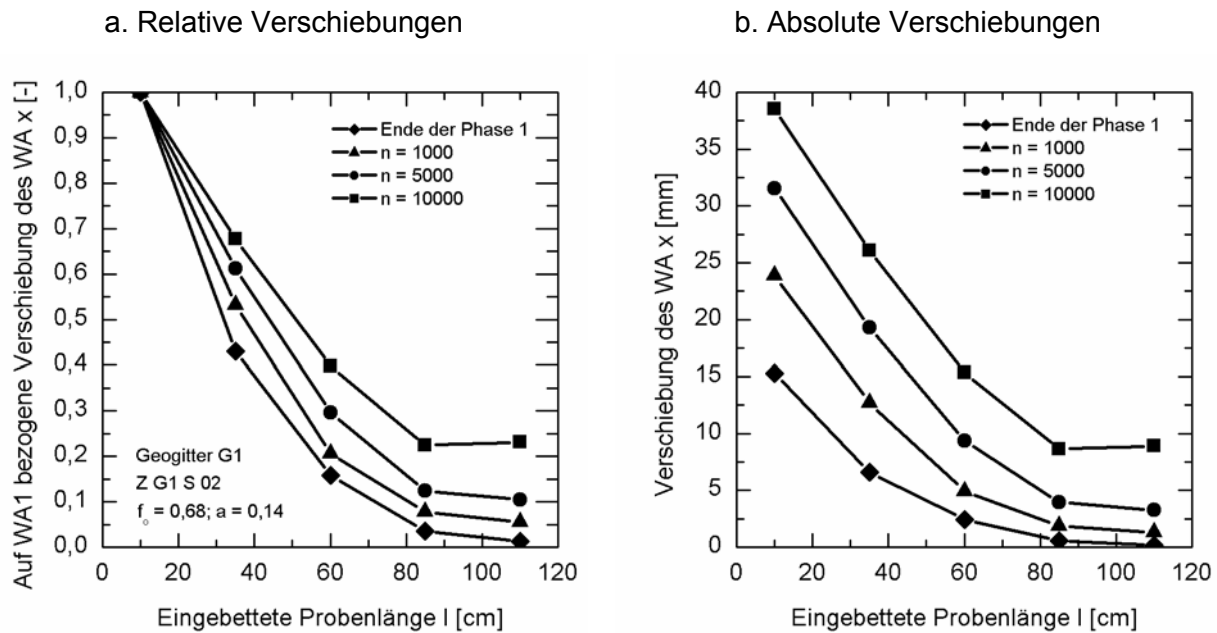


Bild 5.16: Verschiebungen des WA 1 bei einem Geogitter G1 in Sand 0/4 in Abhängigkeit der Lastspielzahl

Bild 5.16 verdeutlicht die Aktivierung der Einbindelänge mit wachsender Lastspielzahl: Während zum Ende der Phase 1 überwiegend die vordere Hälfte des Probenmaterials Verschiebungen erfahren hat, werden im Verlauf der Phase 2 kontinuierlich auch die Messstellen WA 4 und WA 5 aktiviert, obwohl sich das Oberlastniveau nicht verändert. Die zusätzlichen Verschiebungen sind daher ausschließlich auf die Wirkung der Lastspiele zurückzuführen. Ein vergleichbares Phänomen ist bei insgesamt größeren Absolutverschiebungen im hinteren Bereich auch bei Geogitter G2 zu beobachten (Anhang E.2).

Der Anstieg der Verschiebungen in der hinteren Hälfte führt zu einem erhöhten Lastabtragungspotenzial durch sich aufbauenden Erdwiderstand vor den Querstreben. Eine Aussage zur Größenordnung dieser Lasten kann über die Materialdehnung getroffen werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass zusätzliche Dehnungen in Phase 2 ihre Ursache im Kriech- und Strukturverhalten des Materials und in Lastumlagerungen haben können. Diese Anteile können durch die Analyse von Spannungs-Dehnungs-Beziehungen unter zyklischer Belastung an der Luft näher spezifiziert werden, da bei diesem Versuchstypus ausschließlich Kriech- und Strukturphänomene auftreten können.

5.8.3 Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Probe unter zyklischer Belastung

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Probenmaterials während der Phase 2 wird exemplarisch an einem Geogitter G1 untersucht, bei dem während eines zyklischen Standard-Modellversuches zusätzliche Wegmessungen in der freien Länge durchgeführt worden sind (Bild 5.17). In der Phase 1 wird ein dem statischen Kurzzeitversuch vergleichbares Verhalten beobachtet, während es in der Phase 2 zu einem Dehnungsanstieg bei konstantem Ober-

lastniveau F_0 kommt. Dieses Phänomen kann auf Kriecheffekte sowie Strukturänderungen des Bewehrungsmaterials zurückgeführt werden. Für eine explizite Aussage zur Abhängigkeit von den Einflussparametern Amplitude und Lastniveau wird die Durchführung einer Versuchsreihe von In-Air-Versuchen empfohlen. In der Phase 3 ist eine sehr schnelle Zunahme der Horizontalkraft bei geringem Dehnungsanstieg zu beobachten. Es handelt sich hierbei um ein sehr stetiges Materialverhalten, das eventuell auf eine Veränderung der Polymerstruktur aufgrund der zyklischen Einwirkung zurückzuführen ist. Von Müller-Rochholz (1998) wird dieses Verhalten als „Hochtrainieren“ des Materials beschrieben. Nach kurzer Zeit wird in der Phase 3 wieder annähernd die Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem statischen Versuch erreicht. Ein vergleichbares Verhalten ist bei einem In-Air-Versuch am Geogitter G2 beobachtet worden (Anhang E.2).

Min et al. (1995) zeigen in In-Air-Versuchen, dass die Dehnungszunahme bei einem zyklischen Versuch geringfügig kleiner ist als bei einem statischen Versuch gleicher Dauer mit konstanter Aufbringung des zyklischen Oberlastniveaus. Damit ließen sich näherungsweise die statischen Kriechkurven der Hersteller für die Kriechabschätzung heranziehen.

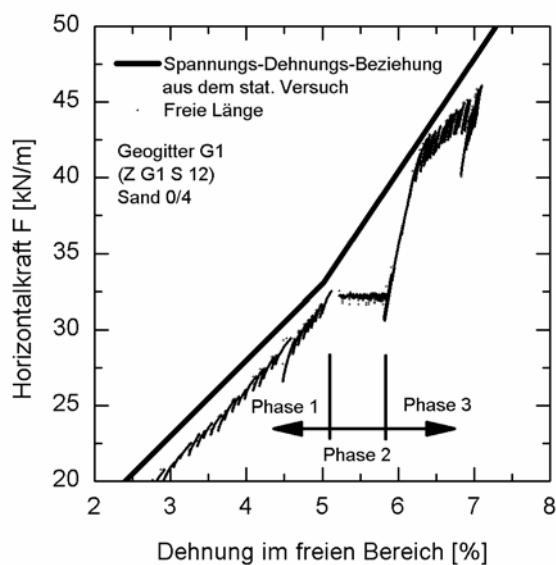


Bild 5.17: Spannungs-Dehnungs-Beziehung in der freien Länge des zyklischen im Vergleich zum statischen Modellversuch

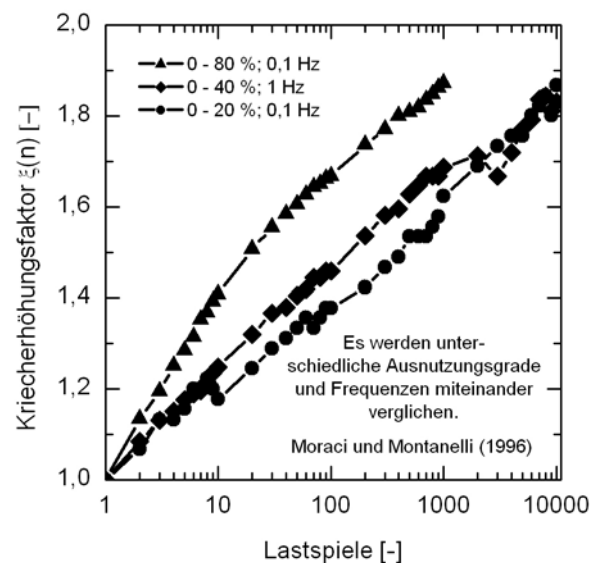


Bild 5.18: Kriecherhöhungsfaktor für unterschiedliche Ausnutzungsgrade und Frequenzen in Abhängigkeit der Lastspielzahl, nach Moraci und Montanelli (1996)

Der Kriecherhöhungsfaktor $\xi(n)$ beschreibt die Größenordnung des durch die Lastspiele hervorgerufenen Kriechens im Material gegenüber dem Ausgangszustand. Nach Moraci und Montanelli (1996/7) kann von einer log-linearen Beziehung zwischen Lastspielen und Kriecherhöhungsfaktor ausgegangen werden (Bild 5.18).

Bei bekanntem Kriechverhalten bei $N = 10.000$ Lastspielen ist eine Berechnung der Dehnung für $n < 10.000$ Lastspiele möglich:

$$\xi(n) = \frac{\xi(N = 10^4) - 1}{\log 10^4} \cdot n + 1 \quad (5.5)$$

mit: $\xi(n)$ = Kriecherhöhungsfaktor zum Zeitpunkt des Lastspiels n

$$\varepsilon(n) = \varepsilon(n = 1) \cdot \xi(n) \quad (5.6)$$

mit: $\varepsilon(n)$ = Dehnung zum Zeitpunkt des Lastspiels n

5.8.4 Verfahren zur Abschätzung der Kräfte in der Probe

Die Zielsetzung des im Folgenden dargestellten Verfahrens besteht in einer quantitativen Abschätzung der Kräfte im Probenmaterial über die eingebettete Einbindelänge in Abhängigkeit der Lastspielzahl. Kräfte im eingebetteten Bereich können nur über Kraft-Dehnungs-Beziehungen ermittelt werden, die jedoch in Abhängigkeit der Lastspielzahl zunächst nicht zur Verfügung stehen.

Dazu ist eine Aufteilung der gemessenen Materialdehnungen entsprechend der in Abschnitt 5.8.3 vorgestellten Methodik in eine Kriech- und eine Lasterhöhungskomponente erforderlich. Nach Literaturlauswertungen (Abschnitt 2.5) ist das zyklische Kriechverhalten In-Air und In-Soil vergleichbar, so dass die In-Air-Versuche auch für die Abschätzung im eingebetteten Bereich herangezogen werden können. Es wird postuliert, dass eine konstante prozentuale Dehnungszunahme in allen Lastbereichen vorliegt, so dass mittels des Kriecherhöhungsfaktors $\xi(n)$ bei bekannter Datenbasis in der freien Länge eine Kraft-Dehnungs-Beziehung in Abhängigkeit der Lastspielzahl (z.B. für $n = 1.000$ Lastspiele) konstruiert werden kann (Bild 5.19). Die detaillierte Konstruktionsmethodik wird in Anhang E.3 beschrieben. Eine entsprechende Konstruktion ist für das Geogitter G2 im verwendeten Versuchsaufbau nicht möglich, da aufgrund der großen Querstrebenabstände keine gesicherte Dehnungsmessung in der freien Länge durchgeführt werden kann.

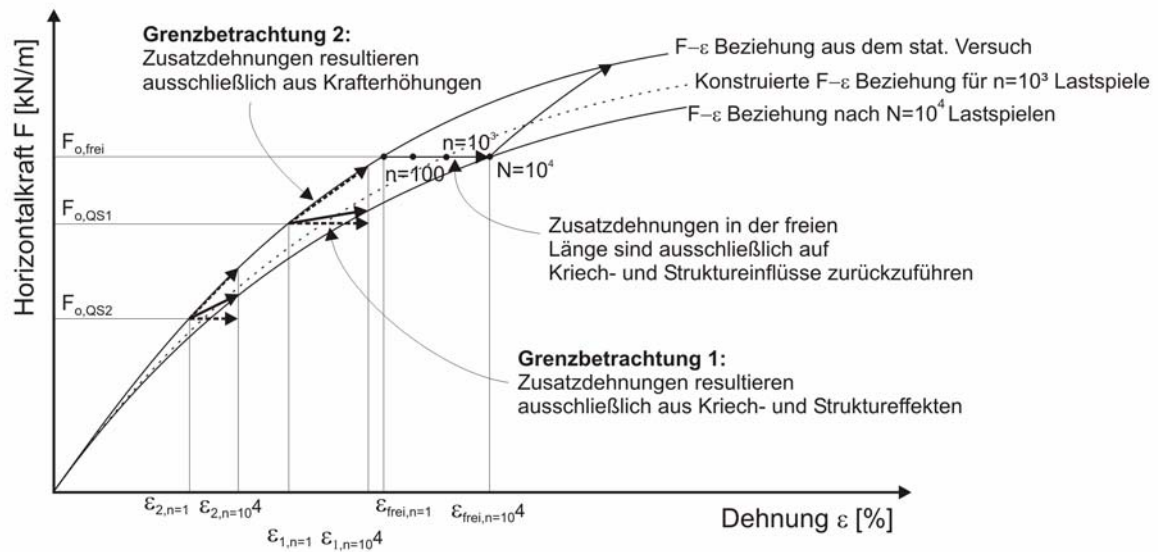


Bild 5.19: Exemplarische Entwicklung der Kraft-Dehnungs-Beziehung in Abhängigkeit der Lastspielzahl mit Angabe von Grenzfällen der Kraftentwicklung

Nach Darstellung der Kraft-Dehnungs-Beziehungen für ausgewählte Lastspielzahlen werden die Dehnungsdaten in die Grafik eingetragen. Während der Versuchsphase 2 erfolgt dabei in allen Abschnitten des Probenmaterials ein Übergang von der ursprünglichen Kraft-Dehnungs-Beziehung zu derjenigen Kurve, die nach n Lastspielen Gültigkeit besitzt. Kommt es dabei ausschließlich zu einer Dehnungserhöhung ohne einhergehende Krafterhöhung, so sind die Zusatzdehnungen ausschließlich auf Kriech- und Struktureffekte zurückzuführen (Grenzbetrachtung 1 in Bild 5.19). Dieses Verhalten ist in der freien Länge zu beobachten. Bei einer Dehnungserhöhung, die zu einer Krafterhöhung im Rahmen der statischen Kraft-Dehnungs-Beziehung führt, resultieren diese Zusatzdehnungen ausschließlich aus Krafterhöhungen in diesem Abschnitt (Grenzbetrachtung 2 in Bild 5.19). Liegt eine Kombination der beschriebenen Phänomene vor, so liegen Zusatzdehnungen aus Kriech- und Struktureffekten und eine Kraftzunahme ΔF_i im entsprechenden Abschnitt vor. Die Größenordnung der Kraftzunahme kann damit konkret quantifiziert werden.

Ein konkretes Versuchsbeispiel für das Geogitter G1 wird im Anhang E.3 vorgestellt.

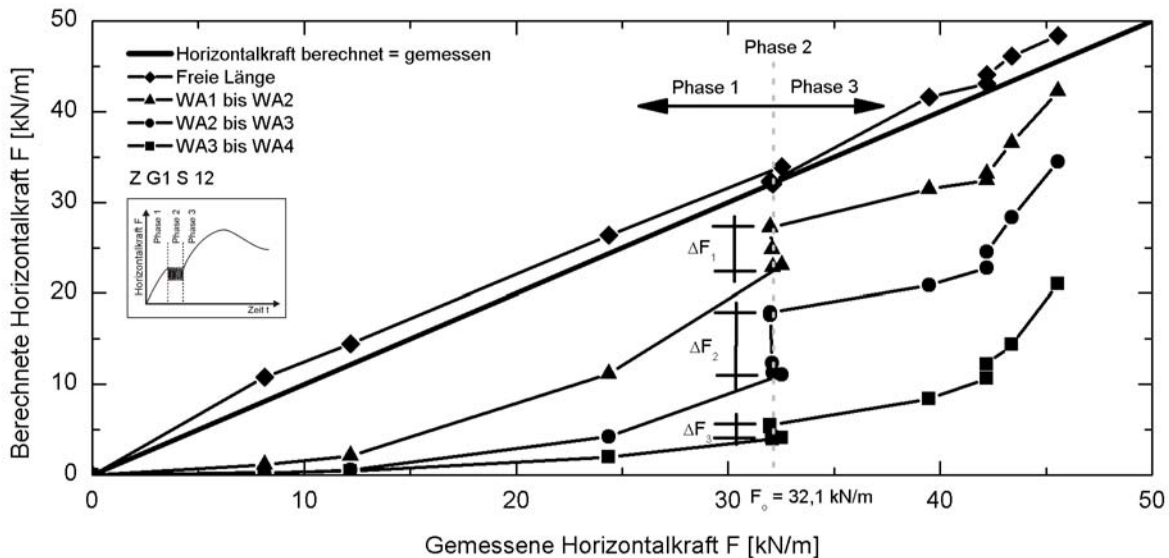


Bild 5.20: Kraftentwicklung im Probenmaterial in Abhängigkeit der gemessenen Kraft für alle drei Phasen des zyklischen Modellversuches

Die Gegenüberstellung von gemessener zu aus den Dehnungen in der freien Länge berechneter Horizontalkraft ermöglicht eine Kontrolle der verwendeten Kraft-Dehnungs-Beziehungen. Bild 5.20 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung dieser Werte für einen Beispielversuch mit Geogitter G1. Des Weiteren lässt sich die um Kriech- und Struktureffekte bereinigte Kraft in den einzelnen Abschnitten des Probenmaterials darstellen. In der Versuchsphase 2 ist insbesondere im mittleren Bereich der Probe eine deutliche Zunahme der Kräfte zu beobachten.

Dies wird möglicherweise durch Brucheffekte aufgrund der Verschiebungen im vorderen Abschnitt hervorgerufen, die eine Weiterleitung der Kräfte in den hinteren Bereich erfordern. Weiterhin ist es möglich, dass durch das größere Lastabtragungspotenzial im hinteren Bereich (Abschnitt 5.8.2) Zusatzkräfte in hintere Abschnitte gezogen werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Kriech- und Struktureffekte vor allem im vorderen Bereich in Abhängigkeit des Lastniveaus und der Amplitude von Relevanz sind. Im Verlauf der Zyklik kommt es zu einer Kraftumlagerung in hintere Probenbereiche in Verbindung mit einer gleichmäßigeren Lastabtragung mit zunehmender Lastspielzahl. Dieses Verhalten nähert sich einem Endzustand, so dass kein gefährliches Phänomen mit fortschreitender Lastumlagerung vorliegt.

5.8.5 Auswertung des statischen Anschlussherausziehens

Zu Beginn der Phase 3 des zyklischen Modellversuches kommt es in der Regel zu einem schnellen Anstieg der Horizontalkraft bei geringen Verschiebungen und Dehnungszunahmen (Bild 5.21). Zur Quantifizierung dieses Phänomens wird ein systematischer Vergleich aller

verwendbaren zyklischen Modellversuche mit den jeweiligen statischen Referenzversuchen durchgeführt. Dazu wird – ausgehend vom jeweiligen Oberlastniveau F_o – ein Vergleich des Kraftzuwachses bei gleicher Verschiebung zwischen zyklischem und statischem Versuch durchgeführt (Bild 5.22).

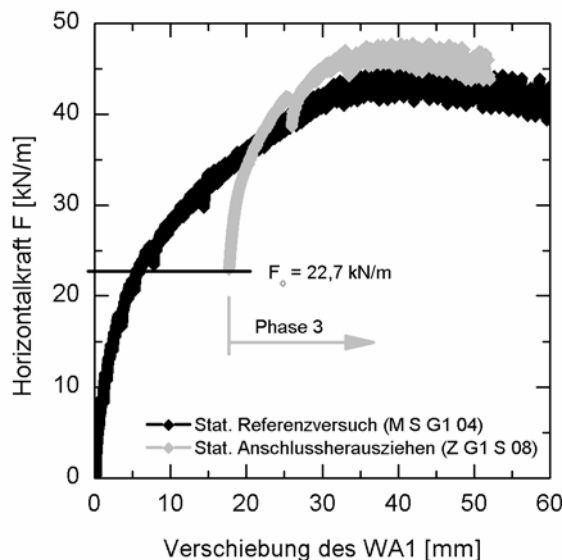


Bild 5.21: Vergleich der Phase 3 eines zyklischen Modellversuches mit dem zugehörigen statischen Referenzversuch

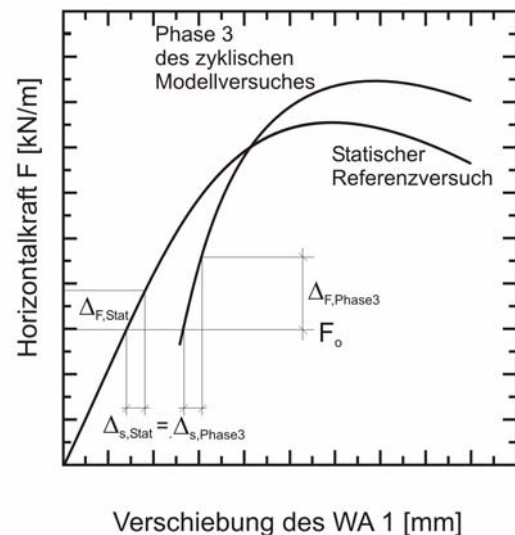


Bild 5.22: Allgemeines Vorgehen beim Vergleich der Phase 3 des zyklischen Modellversuches mit dem zugehörigen statischen Referenzversuch

Die Auswertung dieser Untersuchungen nach den Parametern Oberlastniveau und Amplitude ist in Bild 5.23 dargestellt. Dabei zeigen sich aufgrund der Zusammenfassung aller Versuche, durch Inkonsistenzen und Zusatzeinflüsse aus nicht untersuchten Parametern Datenstreuungen. Deutlich ist jedoch auszumachen, dass der Kraftzuwachs in der Phase 3 bei gleicher Verschiebung im Mittel etwa doppelt so groß ist wie beim statischen Referenzversuch. Während der ersten zwei Millimeter kann sogar ein noch größeres Zuwachsverhältnis beobachtet werden. Der Einfluss des Oberlastniveaus und der Amplitude auf dieses Phänomen kann dabei vernachlässigt werden. Mittlere Amplitudengrößen und Oberlastniveaus zeigen dabei geringfügig höhere Kraftzuwächse. Bei diesen Belastungskombinationen ist das Bewehrungsmaterial optimal über die gesamte Länge aktiviert, ohne dass es im vorderen Bereich bereits zu Brucherscheinungen vor den Querstreben gekommen ist.

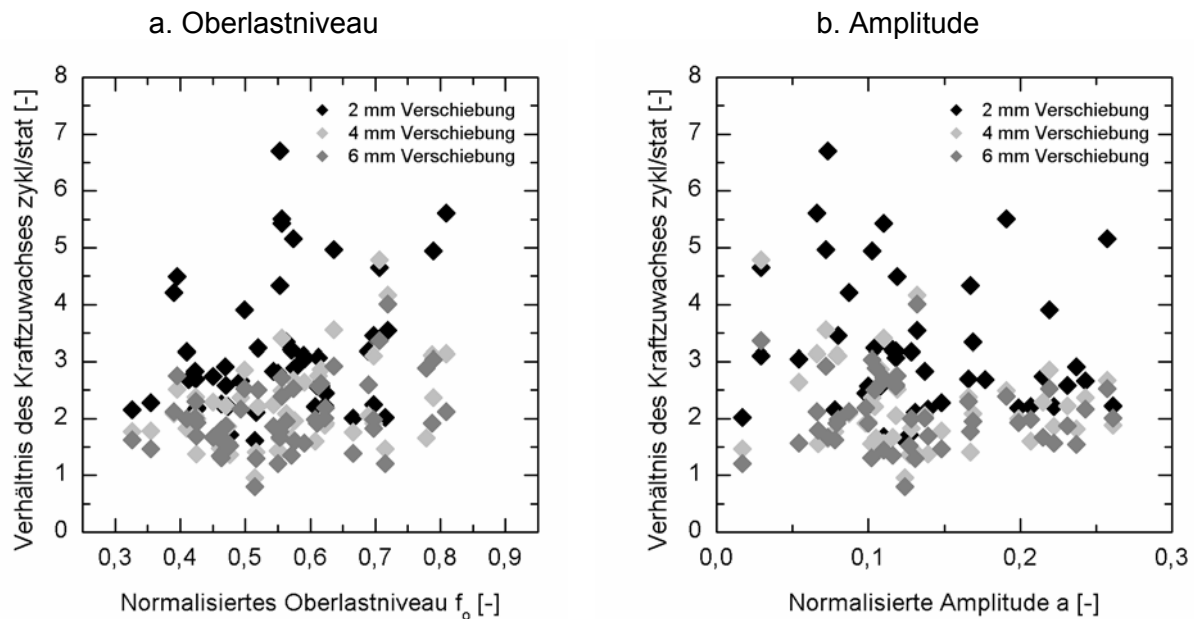
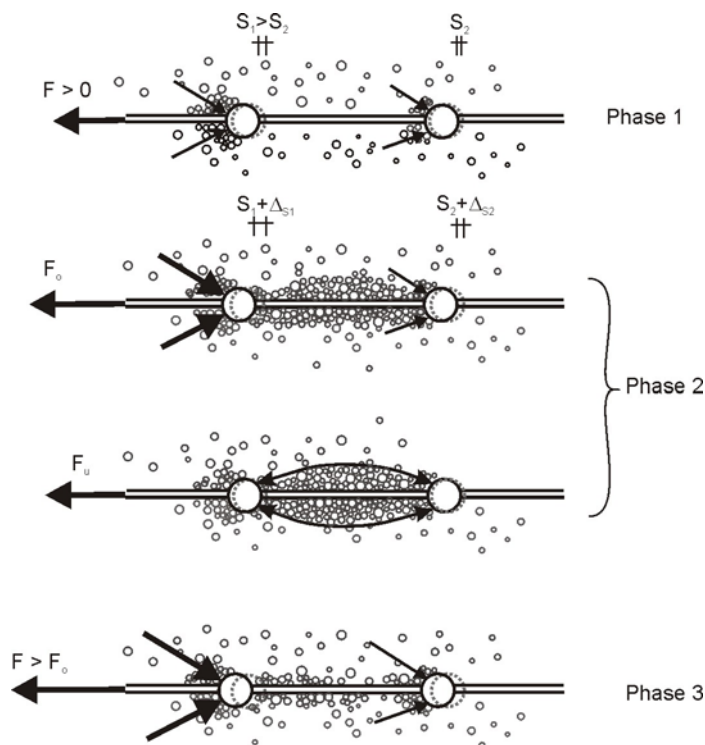


Bild 5.23: Kraftzuwachs in der Phase 3 im Vergleich zum statischen Referenzversuch in Abhängigkeit von Oberlastniveau und Amplitude

Insgesamt führt die Zyklik zu einer Aktivierung größerer Probenabschnitte und damit zu einer Erhöhung des Lastabtragungspotenzials. Dabei kommt es durch wiederholte geringfügige Verschiebungsänderungen zu Verdichtungseffekten im umgebenden Erdstoff. Weiterhin kann es zu Verspannungseffekten zwischen den Querstreben des Geogitters kommen, da sich dieses während der maximalen Belastung durch F_0 dehnt und es zu Erdstoffeinlagerungen kommt (Bild 5.24). Fällt die Horizontalkraft auf F_u ab, geht ein Großteil der Dehnungen zurück und verspannt das zwischen den Querstreben eingekeilte Erdstoffpaket: Es handelt sich um eine „zyklische Bodenverspannung“. Beide Effekte bauen sich im stabilen Belastungszustand während der Lastspiele auf und führen zu einem besseren Gesamtverbund und damit geringeren Verschiebungsinkrementen.

Zu Beginn der Phase 3 stellen die beschriebenen Effekte zunächst ein großes Lastabtragungspotenzial zur Verfügung. Die „zyklische Bodenverspannung“ verliert ihre Wirkung jedoch bei großen Horizontalkräften, so dass der erhebliche Kraftzuwachs in Phase 3 vor allem auf die im Vergleich zum statischen Referenzversuch größere Aktivierungslänge und die Verdichtungseffekte der Phase 2 zurückzuführen ist.

**Bild 5.24:**

Modell der Lastabtragung beim zyklischen Modellversuch in Abhängigkeit der Versuchsphasen

5.9 Extrahierung von Kernaussagen

Es war eine Zunahme der Materialverschiebungen mit der Lastspielzahl zu beobachten, wobei Gitterstrukturen aufgrund ihrer Lastabtragungskomponenten vor den Querstreben ein deutlich duktileres Verhalten aufwiesen als geschlossene Materialien, die Kräfte lediglich über Reibung abtragen. Ein plötzliches Versagen der Struktur infolge zyklischer Belastung kann daher bei Gitterstrukturen bei Vermeidung extremer Beanspruchungszustände ausgeschlossen werden. Aufgrund der Duktilität ist eine Unterscheidung in ein stabiles bzw. instabiles Verhalten sowie die Definition eines Versagenszustandes ein vielschichtiges Problem. Detailliertere Auswertungen hierzu werden in Kapitel 6 vorgenommen.

Relevante statische Einflussfaktoren wie Erdstoff, Bewehrungsmaterial und Auflast werden durch eine Normalisierung der Versuchsdaten des zyklischen Modellversuches auf einen statischen Referenzversuch erfasst. Die Anwendbarkeit dieser Methodik wird ebenfalls in den Kapiteln 6 und 7 detaillierter diskutiert.

Als relevante zyklische Einflussfaktoren wurden die Amplitude sowie das Oberlastniveau ermittelt, während die Frequenz im Rahmen der untersuchten Größenordnungen nur von untergeordneter Bedeutung ist. Steigende Amplituden und Oberlastniveaus führten ab einer mittleren Größenordnung zu deutlich steigenden Verschiebungsentwicklungen. Es wurden Gleichungen vorgestellt, mit denen eine analytische Ermittlung der Verschiebungen der Versuchsphasen 1 und 2 in Abhängigkeit der relevanten Einflussparameter ermöglicht wird.

Gegenüber dem statischen Referenzversuch bei gleichem Lastniveau konnte im zyklischen Modellversuch eine gleichmäßigere Lastabtragung über die Einbindelänge in Verbindung mit einer Lastumlagerung in hintere Probenbereiche beobachtet werden (größere Tiefenwirkung). Dabei kam es vor allem im vorderen Bereich zu einer Beanspruchung des Materials durch Kriech- und Struktureffekte. Eine Methodik zur Trennung von Lastumlagerungs- und Kriech- bzw. Struktureffekten wurde vorgestellt und exemplarisch an einem zyklischen Modellversuch angewendet.

Eine Verbesserung des Verbundverhaltens in der Phase 3 kann im Wesentlichen durch Verdichtungseffekte des Erdstoffes sowie eine „zyklische Bodenverspannung“ während der Lastspiele begründet werden. In Verbindung mit der größeren Tiefenwirkung der Lastabtragung führten diese Phänomene zu einem schnellen Kraftanstieg zu Beginn des statischen Anschlussherausziehens. Dazu wurde ein Modell des zyklischen Lastabtrages vorgestellt.

6 Entwicklung einer Auswertemethodik für zyklische Modellversuche

6.1 Einführung

Die Versuchsergebnisse einzelner Modellversuche mit unterschiedlichen Eingangsparametern lassen sich nur unzureichend miteinander vergleichen, da der Einfluss der jeweiligen Parameter nur abgeschätzt werden kann, wenn Versuche mit mehreren konstanten und jeweils einem variablen Parameter durchgeführt werden (Abschnitt 5.7.1 und 5.7.2). In diesem Kapitel wird daher eine allgemeingültigere Auswertung der Versuchsergebnisse hergeleitet, für die diese Randbedingungen nicht erfüllt werden müssen. Für erste Abschätzungen wird eine Gleichung vorgestellt, die eine Verschiebungsermittlung ohne Durchführung zyklischer Modellversuche erlaubt.

Die einzelnen Phasen des zyklischen Modellversuches sind in Bild 3.14 dargestellt: Bei Versuchsphase 1 handelt es sich um das statische Heranfahren bis zum Beginn der Lastspiele, Phase 2 stellt die Aufbringung der Zyklen dar, und Phase 3 beinhaltet das statische Anschlussherausziehen des Materials.

6.2 Entwicklung der statischen Verschiebungen in der Phase 1

6.2.1 Verifizierung der Versuchsdaten

Vor der weiteren Auswertung der zyklischen Modellversuche ist deren Ergebnisqualität zu überprüfen. Hierzu ist ein Verfahren entwickelt worden, bei dem die Verschiebungen des zyklischen Modellversuches am Ende der Phase 1 mit den entsprechenden Verformungen des statischen Referenzversuches verglichen werden. In Abhängigkeit des Oberlastniveaus können somit Aussagen zur Einbau- und Versuchsqualität getroffen werden.

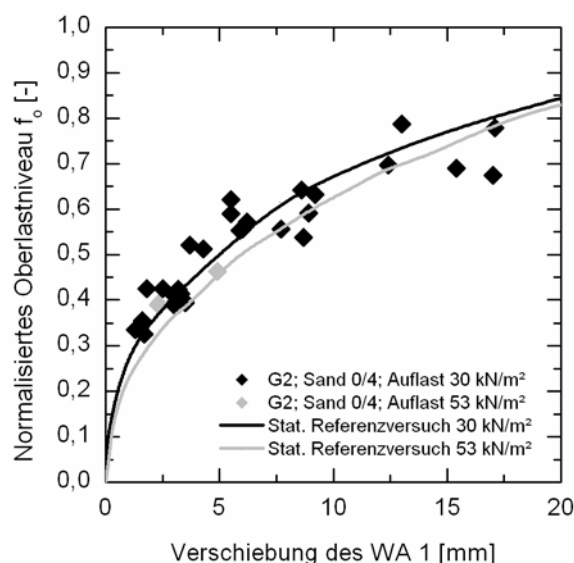


Bild 6.1:

Überprüfung der zyklischen Modellversuche am statischen Referenzversuch (Geogitter G2 im Sand 0/4)

Am Beispiel des Geogitters G2 (Bild 6.1) zeigt sich dabei eine sehr gute Ergebnisübereinstimmung bis zu einem Oberlastniveau von etwa $f_o = 0,65$. Die Abweichungen im höheren Lastbereich sind vor allem in den Horizontalkraftinkonsistenzen des Geogitters G2 begründet (Abschnitt 4.2). Dabei ist eine ingenieurmäßige Versuchsbeurteilung angeraten. Auch bei den Geogittern G1 und G3 und bei Verwendung des Kiesel 2/12 ergibt sich eine sehr gute Ergebnisübereinstimmung (Anhang F.1).

Die Phase 1 des zyklischen Modellversuches kann für eine Überprüfung von Einbau- und systematischen Versuchsfehlern herangezogen werden, ist jedoch zur Aufdeckung von Unstimmigkeiten in der zyklischen Versuchsphase nicht geeignet.

6.2.2 Allgemeingültige Beschreibung der statischen Verschiebungen

Die Verschiebungen am Ende der Phase 1 des zyklischen Modellversuches sind abhängig von den statischen Einflussparametern und dem Oberlastniveau, wobei sich die statischen Einflüsse aus Bewehrungsmaterial und Erdstoff im Wesentlichen auf die maximale Auszugskraft F_p und die maximale Verschiebung s_p reduzieren lassen (Gleichung (6.1)).

$$s_{\text{start}} = f(f_o, \text{statische Einflussparameter}) \approx f(f_o, F_p, s_p, \text{Ausgleichsfunktion}) \quad (6.1)$$

Die Verschiebungen lassen sich mit zwei Verfahren gewinnen:

1. Entnahme aus dem zyklischen Modell- oder statischen Referenzversuch
2. Verwendung normalisierter Kraft-Verschiebungsbeziehungen aus Abschnitt 4.7

Die Methode 1 liefert genaue Werte, bezieht sich jedoch ausschließlich auf die verwendete Materialkombination und ist beim zyklischen Modellversuch auf das entsprechende Oberlastniveau begrenzt. Für allgemeingültige Aussagen ist die Methode 2 besser geeignet, da in Abhängigkeit der Ausgleichsfunktion eine stufenlose Prognose von Daten für beliebige Oberlastniveaus F_o möglich ist Gleichung (6.2). Dazu müssen jedoch die Kennwerte F_p und s_p ermittelt, einer Datenbank entnommen oder abgeschätzt werden.

$$s_{\text{start}} = \left(e^{\frac{\alpha_1 - f_o}{\alpha_2}} - \alpha_3 \right) \cdot s_p \quad (6.2)$$

mit: $f_o = F_o/F_p$

α_i = Regressionskoeffizienten für die statische Verschiebungsberechnung

Die Entwicklung der Verschiebungen in der Phase 1 des zyklischen Modellversuches ist in Bild 6.2 exemplarisch für die Ausgleichsfunktion 1 ausgewertet worden. Es zeigt sich ein überproportionaler Verschiebungsanstieg mit zunehmendem Oberlastniveau. Dabei ist zu

beachten, dass es ab Oberlastniveaus von etwa $f_o = 0,8$ aufgrund der Horizontalkraftinkonsistenzen zu Ergebnisabweichungen kommen kann.

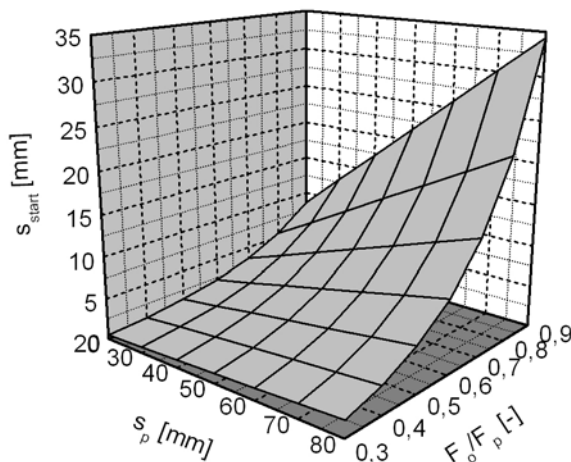


Bild 6.2:

Entwicklung von s_{start} in Abhängigkeit unterschiedlicher Lastniveaus und s_p für die Ausgleichsfunktion 1

6.3 Entwicklung der zyklischen Verschiebungen in der Phase 2

6.3.1 Einführung

Im Abschnitt 5.7 wurden Lastniveau, Amplitude und Lastspielzahl als wesentliche Einflussparameter des zyklischen Modellversuches extrahiert und ein nicht-linearer Zusammenhang ermittelt. Als Zielstellung ergibt sich daher die analytische Beschreibung der Verschiebungsentwicklung in Abhängigkeit dieser Parameter bei einer vorgegebenen Kombination statischer Einflussfaktoren.

Von Relevanz ist dabei eine allgemeine Vergleichbarkeit von Versuchsergebnissen unterschiedlicher Material- und Bodenkombinationen. Aus diesem Grund wird eine Methodik entwickelt, die die Verschiebungsentwicklung für beliebige Kombinationen von Einwirkungsparametern beschreibt. Durch Datenvisualisierung werden entsprechende Versuchsvergleiche erheblich vereinfacht.

6.3.2 Allgemeine Regressionsanalyse

Das Erkennen von Abhängigkeiten und Zusammenhängen verschiedener Merkmale ist die zentrale Intention bei der Analyse statistischen Datenmaterials. Zum einen sollen über die betrachteten Daten qualitative Aussagen gemacht werden, zum anderen ist eine konkrete Quantifizierung der Zusammenhänge von Interesse. Als geeignetes Verfahren steht hierzu die Regressionsanalyse zur Verfügung.

Ziele der Regressionsanalyse sind nach Hartung (2002)

- der Nachweis einer bekannten Beziehung,
- das Schätzen der Parameter einer bekannten funktionalen Beziehung,
- das Erkennen eines funktionalen Zusammenhanges,
- die empirische Repräsentation großer Datenmengen oder
- die Interpolation fehlender bzw. Prognose zukünftiger Werte.

Nach Backhaus et al. (2000) hat sich bei der allgemeinen Regressionsanalyse ein dreistufiger Ablauf bewährt: Formulierung des Modells, Schätzung und anschließende Prüfung der Regressionsfunktion.

Bei der Formulierung des Modells sollen dabei ausschließlich fachliche Gesichtspunkte eine Rolle spielen. Der gewählte Untersuchungsansatz soll die vermuteten Ursache-Wirkungs-Beziehungen möglichst vollständig enthalten.

Zur Schätzung der Regressionsfunktion sind Informationen zu den vermuteten Abhängigkeiten von der abhängigen zu den unabhängigen Variablen von Bedeutung. Es lassen sich einfache oder multiple Regressionsfunktionen mit linearen oder nicht-linearen Zusammenhängen entwickeln.

Die Prüfung der Regressionsfunktion dient der Abschätzung, wie gut sie als Modell der Realität geeignet ist. Bei der globalen Prüfung der Regressionsfunktion wird die Qualität der Abbildung der abhängigen Variable durch das Regressionsmodell geprüft. Bei der Prüfung der Regressionskoeffizienten geht es um die Frage, ob und wie gut einzelne Variablen des Regressionsmodells zur Erklärung der abhängigen Variablen beitragen.

Das Bestimmtheitsmaß misst die Güte der Anpassung der Regressionsfunktion an die empirischen Daten. Die Basis hierfür bilden die Residualgrößen, d.h. die Abweichungen zwischen den Beobachtungswerten und den geschätzten Werten des Merkmals Y. Im Falle einer multiplen Regressionsfunktion wird es auch als multipler Determinationskoeffizient bezeichnet.

$$B = R^2 = \frac{\text{erklärte Variation}}{\text{Gesamtvariation}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6.3)$$

Das Bestimmtheitsmaß B gibt das Verhältnis der geschätzten Werte \hat{y}_i zur Varianz der beobachteten Werte y_i und damit den Anteil an der Varianz von Y, der durch das Merkmal X und damit die Regression erklärt werden kann (Gleichung (6.3)). Eine optimale Anpassung ist dabei bei $B = R^2 = 1$ erreicht (Hartung (2002)).

6.3.3 Zieldefinition der Auswertung

In Abschnitt 5.7 ist eine exponentielle Zunahme der Verschiebung mit steigendem Lastniveau und wachsender Amplitude ermittelt worden. Weiterhin kommt es zu einer Verschiebungszunahme mit steigender Lastspielzahl. Ziel der weiteren Untersuchungen ist es daher, für eine vorgegebene Kombination statischer Einflussfaktoren einen allgemeingültigen analytischen Ansatz zur Beschreibung des Verformungsverhaltens nach Gleichung (6.4) zu ermitteln.

$$s_{\text{zykl}} = f(f_o, a, n) \quad (6.4)$$

Aufgrund der begrenzten Anzahl von Versuchsdaten, versuchsbedingten Datenstreuungen und der hohen Komplexität des Ansatzes ist eine Regressionsermittlung mit allen drei vorgestellten unabhängigen Variablen in akzeptabler Prognosequalität nicht möglich. Da außerdem die Visualisierung und Kontrolle der Ergebnisse bei drei unabhängigen Variablen erheblich erschwert würde, werden für die gewünschten Lastspielzahlen n separate Untersuchungen mit dem Oberlastniveau und der Amplitude als unabhängige Variablen vorgenommen.

6.3.4 Beschreibung der zyklischen Verschiebungen

6.3.4.1 Wahl einer geeigneten Ansatzfunktion und Berechnungsmethodik

Zur Formulierung eines geeigneten Regressionsmodells gehört zunächst die Überprüfung der Unabhängigkeit der Eingangsvariablen: Oberlastniveau und Amplitude besitzen dabei untereinander keinen gegenseitigen Zusammenhang. Alle Variablen liegen im metrischen Skalenniveau vor.

Aufgrund des bereits festgestellten exponentiellen Zusammenhanges zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen wird die allgemeingültige Gleichung (6.5) den weiteren Untersuchungen zugrunde gelegt.

$$s_{\text{zykl}} = \beta_1 \cdot e^{\beta_2 \cdot f_o + \beta_3 \cdot a + m} \quad (6.5)$$

mit: $f_o = F_o/F_p$

$a = A/F_p$

β_i = Regressionskoeffizienten für den zyklischen Verschiebungsanteil

m = Von der Materialkombination abhängiger Zusatzterm

Der vereinfachte Ansatz mit $m = 0$ entsprechend Gleichung (6.6) liefert für alle untersuchten Materialkombinationen eine hinreichende Abbildungsqualität. Für den Fall des Geogitters G2 lässt sich eine signifikante Verbesserung der Abbildungsqualität durch die Wahl von $m = \beta_4 \cdot f_o \cdot a$ entsprechend Gleichung (6.7) erzielen. Dabei werden Inkonsistenzen der Horizontal-

kraft bei hohen Oberlastniveaus und eine schnellere Komplettaktivierung des Bewehrungsmaterials bei der Aufbringung höherer Amplituden besser berücksichtigt.

Ansatzfunktion 1: $s_{\text{zykl}} = \beta_1 \cdot e^{\beta_2 \cdot f_0 + \beta_3 \cdot a}$ **(6.6)**

Ansatzfunktion 2: $s_{\text{zykl}} = \beta_1 \cdot e^{\beta_2 \cdot f_0 + \beta_3 \cdot a + \beta_4 \cdot f_0 \cdot a}$ **(6.7)**

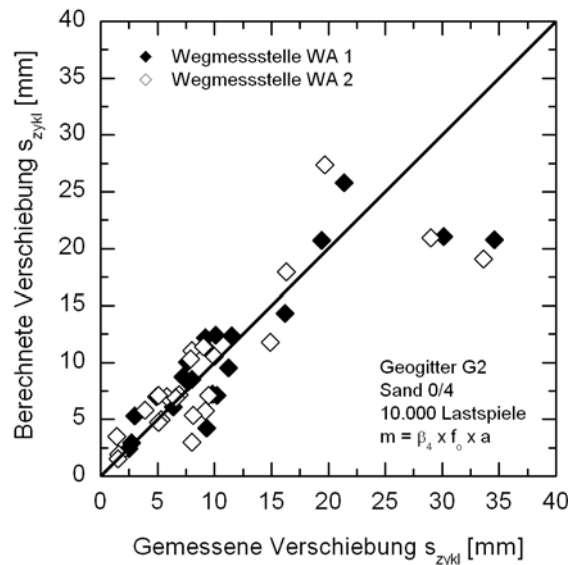
Die entsprechenden Ansatzfunktionen werden zunächst linearisiert, um die Regressionskoeffizienten mittels der Rechenvorschrift der „Methode der kleinsten Fehlerquadrate“ entsprechend Anhang F.2 zu ermitteln. Hierzu werden die Softwaresysteme Matlab 7 von The Mathworks und SPSS von SPSS GmbH Software verwendet.

Eine Zusammenstellung der ermittelten Regressionskoeffizienten sowie der jeweils optimalen Ansatzfunktion ist dem Anhang F.3 zu entnehmen.

6.3.4.2 Überprüfung der Ergebnisqualität

Die Überprüfung der Qualität der Regressionsfunktion erfolgt durch das Bestimmtheitsmaß und die mittlere Abweichung der Verschiebung in Prozent sowie als Absolutwert in Millimetern. Bei einigen Kombinationen von Eingangsparametern haben diese Kennwerte nur informativen Charakter, da für eine fundierte statistische Aussage eine deutlich größere Datenbasis zur Verfügung stehen müsste. Zur Verdeutlichung von Tendenzen sind diese Daten jedoch uneingeschränkt verwendbar.

Eine Zusammenstellung der Überprüfungsergebnisse für unterschiedliche Geokunststoff/Erdstoffkombinationen ist in Abhängigkeit der Lastspielzahl dem Anhang F.4 zu entnehmen. Dabei ist für die Geogitter G1 und G3 die Gleichung (6.6) und Geogitter G2 die Gleichung (6.7) verwendet worden. Die Kennwerte deuten in der Regel auf eine gute Abbildung der berechneten zyklischen Verschiebungen durch die Regressionsfunktion im Bereich üblicher Verschiebungen hin. Die Absolutwerte der mittleren Abweichungen liegen dabei durchweg deutlich unterhalb des Größtkorns des verwendeten Erdstoffes und zeigen damit eine akzeptable Größenordnung. Vergleichbare Ergebnisse liefert auch der Wegaufnehmer 2 des Probenmaterials, so dass von einer Verschiebungsregression an beliebigen Messpunkten des Materials ausgegangen werden kann.

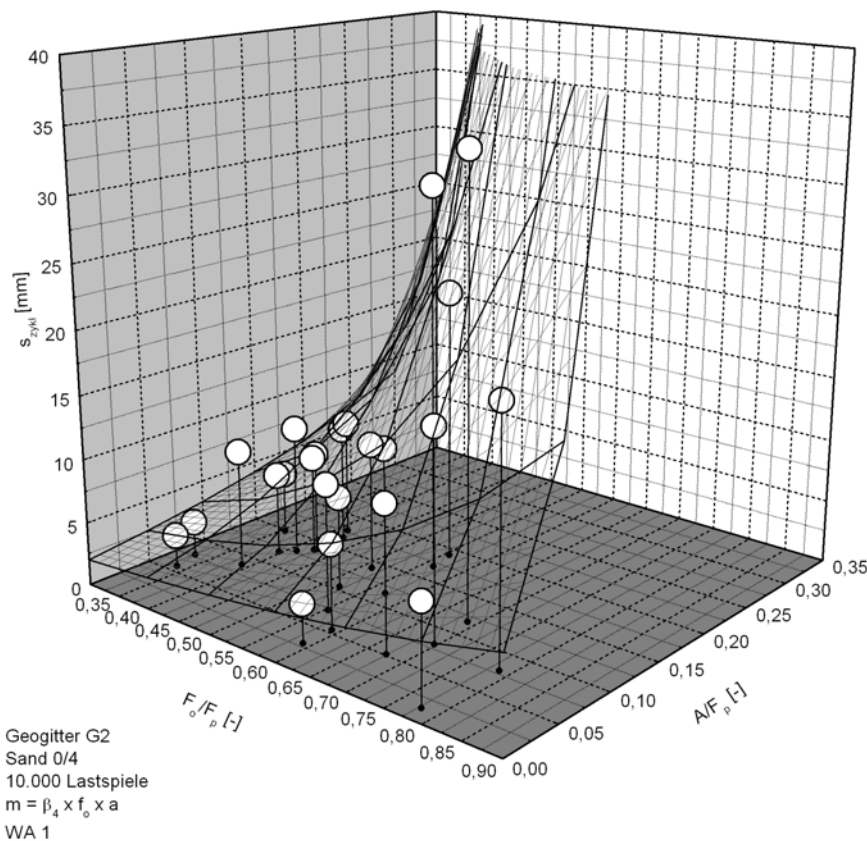
**Bild 6.3:**

Überprüfung der Qualität der gewählten Ansatzfunktion durch einen Vergleich der Verschiebungen mit den Messdaten

Exemplarisch werden berechnete und gemessene Verschiebungen für das Geogitter G2 im Sand in Bild 6.3 gegenübergestellt. Es zeigt sich eine gute Abbildung der Versuchswerte durch die Regressionsfunktion. Lediglich im Bereich großer Verschiebungen kommt es zu größeren Differenzen, da die Wirkung von Inkonsistenzen sich hier bemerkbar macht und die Datenbasis im Bereich hoher Verschiebungen für eine exakte Modellierung nicht ausreichend ist. Eine breite Streuung der Eingangsparameter Oberlast und Amplitude bei der Versuchsdurchführung erhöht daher die Aussagekraft der Regression.

6.3.4.3 Visualisierung der Ergebnisse

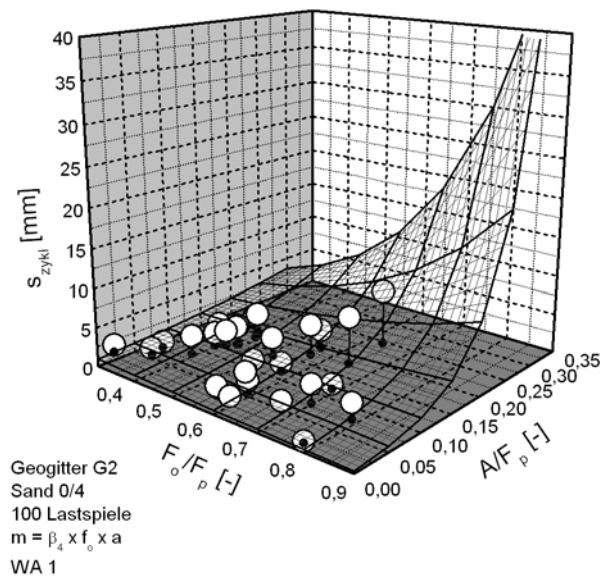
Die Visualisierung der Regressionsdaten erfolgt in einem dreidimensionalen Diagramm mittels eines Gitternetzes, wobei die unabhängigen Variablen auf der x- und der y-Achse und die abhängige Variable auf der z-Achse aufgetragen werden. Vorhandene Versuchsergebnisse werden als Datenpunkte in diese Darstellung integriert, so dass ein direkter Vergleich prognostizierter und gemessener Werte ermöglicht wird. In Bild 6.4 wird die Auswertung der zyklischen Verschiebungen für die hohe Datendichte des Geogitters G2 im Sand 0/4 bei 10.000 Lastspielen exemplarisch aufgezeigt. Zum Vergleich werden im Bild 6.5 dieselben Versuche bei 100 Lastspielen sowie an Wegaufnehmer 2 ausgewertet. Weitere Abbildungen sowie eine Übersichtstabelle aller beigefügten Diagramme sind dem Anhang F.5 zu entnehmen.

**Bild 6.4:**

Darstellung der zyklischen Verschiebungen in Abhängigkeit des Oberlastniveaus und der Amplitude

Es zeigt sich bei allen Gitternetzen eine starke Zunahme der zyklischen Verschiebungen mit steigendem Oberlastniveau und wachsender Amplitude. Im oberen Belastungsbereich, der im Gitternetz durch die Form eines senkrechten Zylinders symbolisiert werden kann, führen dabei bereits sehr geringe Erhöhungen der Eingangsparameter zu sehr deutlichen Verschiebungszuwächsen. Dieser Trend kristallisiert sich bei 10.000 Lastspielen bereits deutlich stärker als bei 100 Lastspielen heraus. In der sehr kurzen zyklischen Belastungsphase von 100 Zyklen machen sich versuchsbedingte Schwankungen noch deutlich stärker bemerkbar als nach einer größeren Zahl aufgebrachter Lastspiele. Die Auswertung des Wegaufnehmers 2 ergibt ein ähnliches Gitternetz wie Messstelle 1. Zyklische Verschiebungen an anderen Messstellen können daher nach derselben Methodik berechnet werden.

a. Geogitter G2, 100 Lastspiele, WA 1



b. Geogitter G2, 10.000 Lastspiele, WA 2

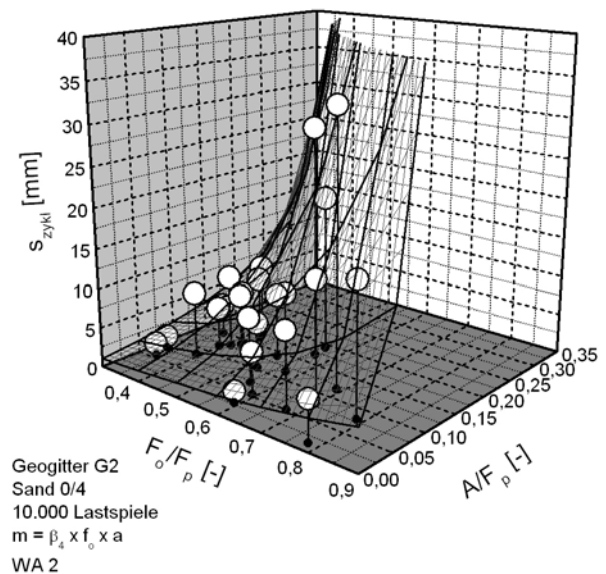


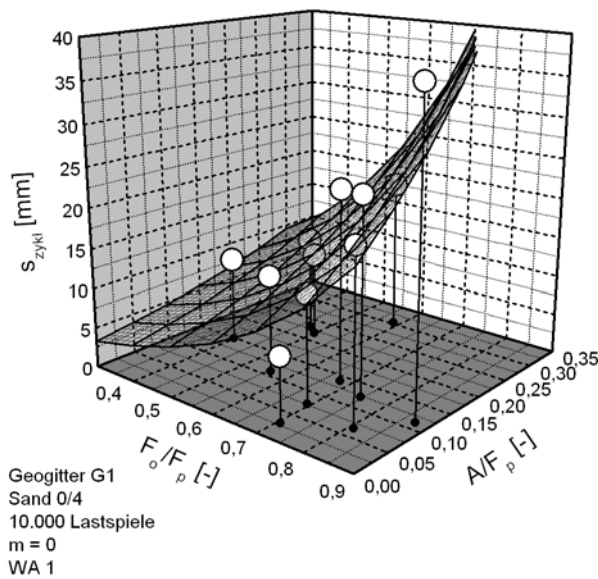
Bild 6.5: Darstellung der zyklischen Verschiebungen mit einer Variation der Lastspielzahl und der Wegmessstelle

Die Darstellung von 1.000 Lastspielen des Geogitters G2 im Anhang F.5 zeigt eine konsistente Entwicklung des Gitternetzes mit steigender Lastspielzahl.

6.3.4.4 Besonderheiten bei einer Variation der Eingangsparameter

Geogitter G1 zeigt ein deutlich duktileres Verschiebungsverhalten bei Belastung durch hohe Oberlastniveaus und hohe Amplituden als G2: Die Zunahme der Verschiebungen bei einer Belastungserhöhung ist bei Geogitter G1 insgesamt gleichmäßiger, so dass die Gefahr plötzlichen Versagens geringer ist (Bild 6.4 und Bild 6.6a). Insbesondere im unteren Belastungsbereich sind dabei größere Grundverschiebungen zu beobachten. Zu vermuten ist dabei, dass das Verschiebungsniveau aufgrund der geringeren Dehnsteifigkeit von Geogitter G1 und damit verbundenen Materialdehnungen zunimmt. Da das Material zunächst nur abschnittsweise aktiviert wird (Abschnitt 5.8.2), können bei einer Belastungserhöhung noch hintere Bereiche der Einbindelänge zusätzlich aktiviert werden, während bei Geogitter G2 bereits nach kurzer Zeit der gesamte Probenbereich aktiviert worden ist.

a. Geogitter G1, 10.000 Lastspiele, WA 1



b. Geogitter G2, 10.000 Lastspiele, Kies 2/12

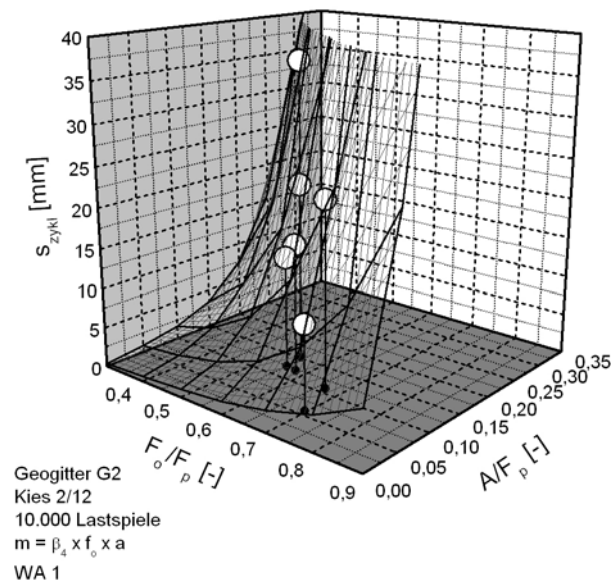


Bild 6.6: Darstellung der zyklischen Verschiebungen mit einer Variation des Geogitters und des Erdstoffes

Bei einem Vergleich mit den Ergebnissen der zyklischen Modellversuche im Kies 2/12 ist zu beachten, dass dort eine deutlich geringere Auflast aufgebracht worden ist (Kapitel 3). Insgesamt sind die Verschiebungszunahmen bei wachsendem Oberlastniveau und vor allem bei steigender Amplitude im Kies stärker ausgebildet als bei den Sandversuchen. Der dominierende Lastabtragungsmechanismus des Interlock greift dabei nach einer bestimmten Verschiebung. Es ist jedoch zu vermuten, dass große Amplituden bei einer Komplettaktivierung des Bewehrungsmaterials immer wieder den Interlock aufbrechen und zu zusätzlichen Verschiebungen führen. Die im Vergleich zum Sand geringere Anzahl an Kornkontakten zwischen Erdstoff und Bewehrungsmaterial führt zu einer verringerten Ausprägung der Reibungskomponente.

Weitere Visualisierungen sind dem Anhang F.5 zu entnehmen.

6.3.5 Allgemeingültige Beschreibung der zyklischen Verschiebungen

Das Ziel weiterer Untersuchungen liegt in der Ermittlung einer allgemeingültigen Gleichung zur Prognose zyklischer Verschiebungen, um die aufwändige, materialspezifische Darstellung zu vereinfachen.

Aufgrund des in Abschnitt 6.3.4.4 beschriebenen unterschiedlichen Verformungsverhaltens verschiedener Materialkombinationen kommt es bei einer Regressionsanalyse aller Daten nach Gleichung (6.6) zu einer Überschätzung der Verschiebungen des Geogitters G3 und zu einer deutlichen Unterschätzung der Verschiebungen des Kiesmaterials. Da es sich hierbei

um eine Prognosediskrepanz auf der unsicheren Seite handelt, wird eine Zerteilung der allgemeinen Prognose entsprechend des Erdstoffes vorgenommen.

Die allgemeingültigen zyklischen Verschiebungen werden für die durchgeführten Versuche entsprechend folgender Gleichungen ermittelt:

Sand: $s_{\text{zykl}} = e^{3 \cdot f_0 + 6 \cdot a}$ (6.8)

Kies: $s_{\text{zykl}} = e^{3 \cdot f_0 + 10 \cdot a}$ (6.9)

Dem Bild 6.7 ist zu entnehmen, dass die vorgestellten Gleichungen einen guten Kompromiss zwischen allgemeingültiger Abschätzung und akzeptabler Prognosequalität für die durchgeführten Versuche darstellen. Das Verfahren sollte jedoch nur für eine erste Verformungsabschätzung verwendet werden, da in Einzelfällen erhebliche Prognosediskrepanzen auftreten können.

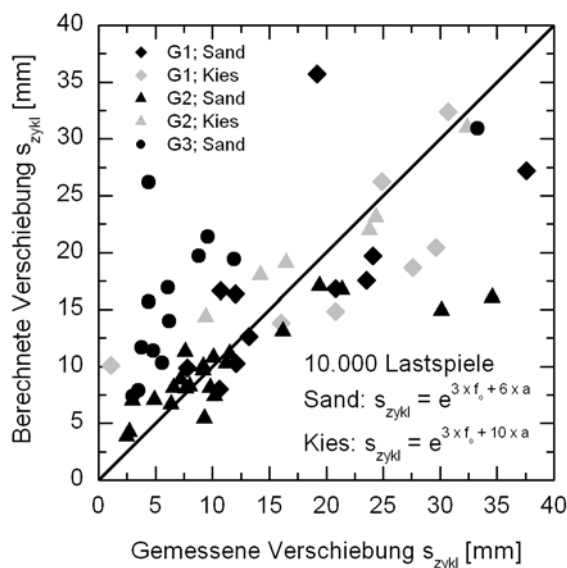


Bild 6.7:

Überprüfung der Qualität der gewählten Ansatzfunktionen durch einen Vergleich der prognostizierten Verschiebungen mit den Messdaten

6.4 Ermittlung der Gesamtverschiebungen

6.4.1 Prognose der Gesamtverschiebungen

Eine Ermittlung der Gesamtverschiebungen nach n Lastspielen ist durch eine Kombination der in den Abschnitten 6.2 und 6.3 vorgestellten Gleichungen möglich (Gleichung (6.10)). Es ergibt sich dabei eine Abhängigkeit der Gesamtverschiebungen vom Oberlastniveau und der Amplitude sowie von statischen Einflussparametern. Der Index „start“ symbolisiert dabei die in der Versuchsphase 1 des zyklischen Modellversuches zurückgelegten Verschiebungen.

$$s_{\text{start+zykl}}\left(s_p; \frac{F_o}{F_p}; \frac{A}{F_p}\right) = s_{\text{start}}\left(s_p; \frac{F_o}{F_p}\right) + s_{\text{zykl}}\left(\frac{F_o}{F_p}; \frac{A}{F_p}\right) \quad (6.10)$$

Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Ansatzfunktionen zur Ermittlung der zyklischen Verschiebungen ergeben sich Gleichungssysteme, die die Kenntnis der statischen und zyklischen Regressionskoeffizienten α_i und β_i voraussetzen. α_i können aus einem statischen Referenzversuch oder unter Verwendung einer Ausgleichsfunktion nach Abschnitt 4.8 ermittelt werden, während β_i durch eine Regressionsanalyse mehrerer zyklischer Modellversuche oder aus dem Anhang F.3 extrahiert werden können. In der Gleichung (6.11) ist das Gleichungssystem exemplarisch für die Gültigkeit der zyklischen Ansatzfunktion 1 mit $m = 0$ angegeben. Die Gleichungen für die Ansatzfunktion 2 sind dem Anhang F.6 zu entnehmen.

$$s_{\text{start+zykl}} = \left(e^{\frac{\alpha_1 - f_o}{\alpha_2}} - \alpha_3 \right) \cdot s_p + \beta_1 \cdot e^{\beta_2 \cdot f_o + \beta_3 \cdot a} \quad (6.11)$$

mit: s_p = Verschiebung zum Zeitpunkt der maximalen Auszugskraft
 α_i = Statische Regressionskoeffizienten
 β_i = Regressionskoeffizienten für den zyklischen Versuchsanteil

Das vorgestellte Verfahren ermöglicht die Konstruktion von Verschiebungsnomogrammen beliebiger Gesamtverschiebungen für vorgegebene statische Eingangparameter sowie zyklische Ansatzfunktionen. Dazu wird für ein beliebiges Oberlastniveau zunächst die in der Versuchsphase 1 erwartete Verschiebung berechnet. Aus dem verbleibenden Verschiebungsbetrag wird die maximal aufbringbare Amplitude bestimmt, so dass die ermittelte Kombination zyklischer Einflussparameter genau die gewünschte Gesamtverschiebung erzeugt. Die entsprechende Gleichung ist für die Ansatzfunktion 1 exemplarisch in Gleichung (6.12) angegeben. Die Gleichung der Ansatzfunktion 2 ist dem Anhang F.6 zu entnehmen.

$$a = \frac{\ln \left(s_{\text{start+zykl}} - \left(e^{\frac{\alpha_1 - f_o}{\alpha_2}} - \alpha_3 \right) \cdot s_p \right) - \ln \beta_1 - \beta_2 \cdot f_o}{\beta_3} \quad (6.12)$$

mit: a = Amplitude zur Erzeugung vorgegebener Gesamtverschiebungen für gewählte f_o

6.4.2 Visualisierung der Ergebnisse

Die Erstellung der Verschiebungsnomogramme erfolgt für unterschiedliche Materialkombinationen, Lastspielzahlen und Wegmessstellen. In Abhängigkeit von der normalisierten Ampli-

tude und dem Oberlastniveau werden unterschiedliche Verschiebungsstufen eingezeichnet. Die maximal aufgenommene Verschiebung entspricht der maximalen Verschiebung im statischen Referenzversuch zum Zeitpunkt des Peaks s_p . Zu Vergleichszwecken sind aus dem zyklischen Versuchsprogramm ermittelte Daten im Nomogramm enthalten. Auch in dieser Darstellung lässt sich die gute Übereinstimmung von berechneten und gemessenen Werten erkennen. Zu beachten ist, dass es bei hohen Oberlastniveaus zu geringfügigen Abweichungen in der statischen Ausgleichsfunktion kommen kann (Abschnitt 4.7).

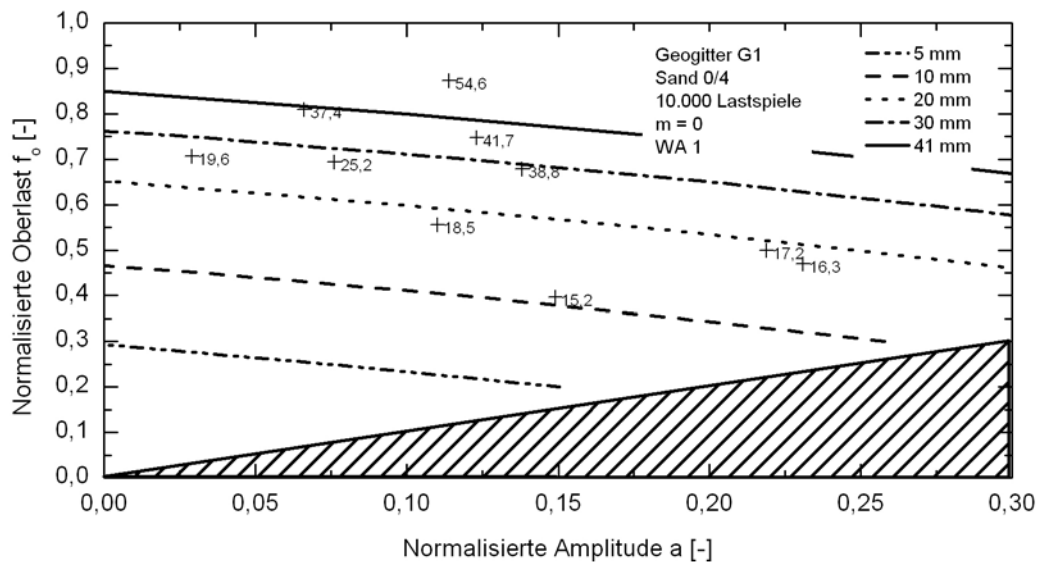


Bild 6.8: Verlauf der berechneten Gesamtverschiebung für Geogitter G1 an WA 1 bei 10.000 Lastspielen im Sand 0/4

Die Verschiebungsverläufe der Geogitter G1, G2 und G3 bei 10.000 Lastspielen sind im Sand 0/4 im Wesentlichen vergleichbar (Bild 6.8/Bild 6.9/Anhang F.7). Die Kurven des Materials G1 verlaufen etwas flacher und schneiden die Ordinatenachse an einer tieferen Stelle. Die Ursache liegt in den Inkonsistenzen der Horizontalkraft bei hohen Oberlastniveaus des Geogitters G2, die zu größeren statischen und zyklischen Verschiebungen führen. Die Verschiebungen des Geogitters G1 im Bereich hoher Amplituden sind geringfügig kleiner als bei Geogitter G2. Die Ursache könnte in einer Lastabtragung liegen, die sich aufgrund der geringeren Dehnsteifigkeit des Materials und der hohen Anzahl Querstreben effektiver auf den vorderen Bereich konzentriert (Abschnitt 5.8.2). Die geringere Dehnsteifigkeit des Gitters G1 und die ausgeprägtere Möglichkeit eines elastischen Lastabtrages führt auch zu den höheren Verschiebungen im Bereich sehr geringer Amplituden-Beanspruchung.

Die Auswertung der Verschiebungsnomogramme für den Wegaufnehmer 2 zeigt einen vergleichbaren Verlauf wie bei Wegaufnehmer 1 bei insgesamt geringeren Absolutwerten (Anhang F.7). Der Grund liegt in den höheren Dehnungen des ersten Abschnittes, die von der Wegmessstelle 2 nicht mehr erfasst werden. Die Allgemeingültigkeit des Verfahrens und der Darstellung unabhängig von der Messstelle kann damit gezeigt werden.

Die Darstellung der Verschiebungskurven nach 100 aufgebrauchten Lastspielen zeigt geringe Auswirkungen der Amplitude auf die Größe der Verschiebungen, da die statischen Verschiebungen der Phase 1 mit ihrer Oberlastabhängigkeit bei geringen Lastspielzahlen überwiegen (Bild 6.11).

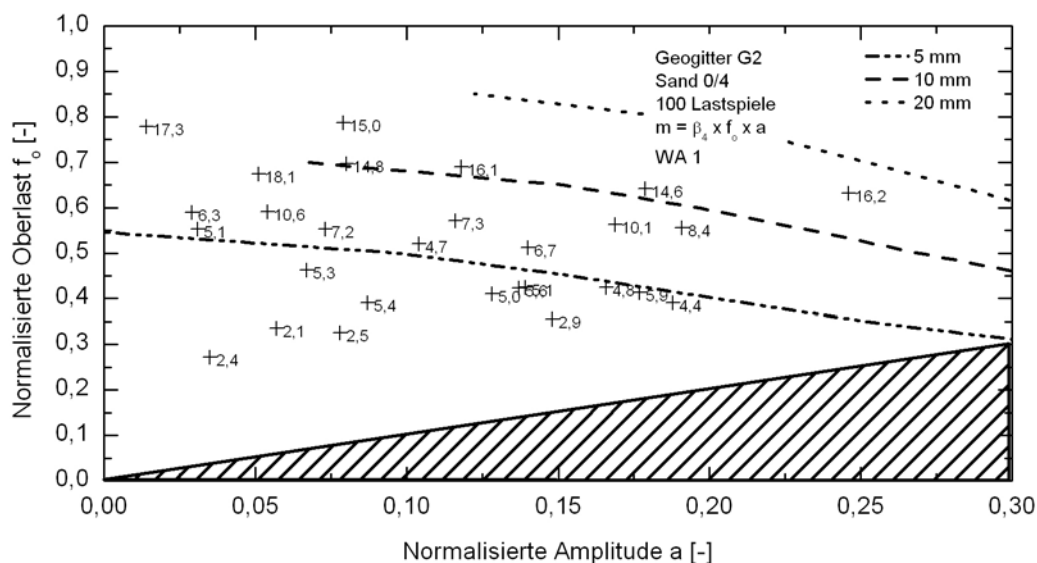


Bild 6.11: Verlauf der berechneten Gesamtverschiebung für Geogitter G2 an WA 1 bei 100 Lastspielen im Sand 0/4

Es zeigt sich, dass bei einer normalisierten Darstellungsform unabhängig von Geogitter und Erdstoff im Wesentlichen vergleichbare Verschiebungsverläufe bei gleichen Lastspielzahlen auftreten. Lediglich bei höheren Amplituden werden im Kies geringfügig größere Verschiebungen ermittelt. Dies bestätigt die Methodik des Datenbezuges auf die maximale Horizontalkraft im statischen Referenzversuch F_p .

6.4.3 Allgemeingültige Prognose der Gesamtverschiebungen

Aufbauend auf der allgemeingültigen Darstellung der zyklischen Verschiebungen in Abschnitt 6.3.5 werden in Bild 6.12 und Anhang F.7 die Gesamtverschiebungen aller ausgewerteten zyklischen Modellversuche vorgestellt. Dabei ist für alle Versuche eine statische Peakverformung s_p von 50 mm zugrunde gelegt worden.

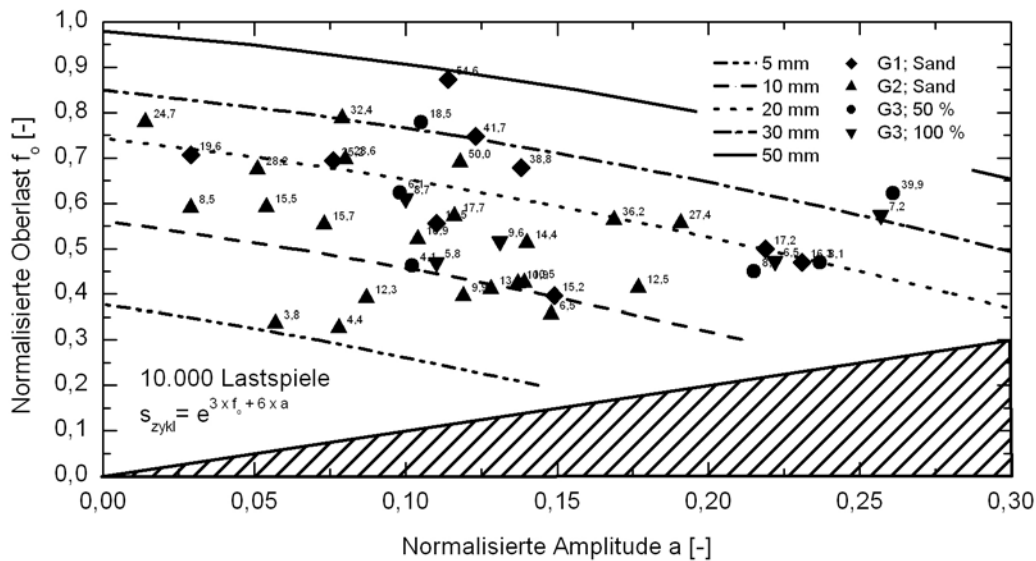


Bild 6.12: Abschätzung des Verlaufes der berechneten Gesamtverschiebung für alle untersuchten Geogitter an WA 1 bei 10.000 Lastspielen im Sand 0/4

Bild 6.12 zeigt, dass die Gesamtverschiebungen des Geogitters G3 aufgrund des guten zyklischen Verbundes überschätzt werden. Diese Abweichungen liegen jedoch auf der sicheren Seite. Einige Versuchsdaten können von dem allgemeingültigen Modell nur befriedigend abgebildet werden. Insgesamt handelt es sich jedoch um ein gutes Hilfsmittel zur ersten Abschätzung zyklischer Verformungen.

Aufgrund der geringeren Datendichte und –qualität sollte die für die ausgewerteten Kiesversuche entwickelte Darstellung in Anhang F.7 nur zu informativen Zwecken herangezogen werden.

6.5 Entwicklung eines Kriteriums zur Definition des Versagens im zyklischen Modellversuch

6.5.1 Diskussion unterschiedlicher Versagenskriterien

Bei den in Abschnitt 6.4 vorgestellten Verschiebungsnomogrammen handelt es sich um eine reine Verformungsdarstellung ohne Beurteilung der Zulässigkeit bestimmter Verformungen in der Bemessung. Im statischen Auszugsversuch wird der Versagenszustand in der Regel über die maximal erreichte Horizontalkraft festgelegt, wobei eine maximale Verformung dabei automatisch miterfasst wird. Ein Versagenszustand wird bei den zyklischen Modellversuchen über ein verformungsbasiertes Kriterium definiert.

Die Definition des Überganges von einem stabilen zu einem instabilen Verhalten wird in der Literatur in unterschiedlicher Weise festgelegt.

Touahmia et al. (1997) sprechen von einem stabilen Verhalten, solange die Verschiebungsinkremente mit jedem weiteren Lastspiel abnehmen. Bei diesem Kriterium besteht die Gefahr, dass Versuche mit großen, aber abnehmenden Verschiebungsinkrementen trotz inakzeptabler Absolutverschiebungen als stabil eingestuft werden.

Raju (1995) führt zusätzlich zum Kriterium der abnehmenden Verschiebungsinkremente eine Überprüfung der inkrementellen Dehnung zwischen Klemme und eingebettetem Ende der Probe ein. Sind zusätzliche Verschiebungen auf Materialdehnungen zurückzuführen, so handelt es sich um ein stabiles Verhalten, bei einer Starrkörperverschiebung wird das Verhalten als instabil klassifiziert. Als besonders gefährlich wird von Raju die vorstellbare Situation d. in Bild 6.13 bezeichnet, bei der die Verschiebungsinkremente zunächst abnehmen, nach einer bestimmten Lastspielzahl aber ein weiterer Zuwachs der Inkremente zu verzeichnen ist. Als sichere Versuchsentwicklungen werden die Fälle a. und b. bezeichnet. Zu beachten ist, dass die vorgestellten Betrachtungen auf einer maximalen Versuchs-Lastspielzahl von 10 beruhen.

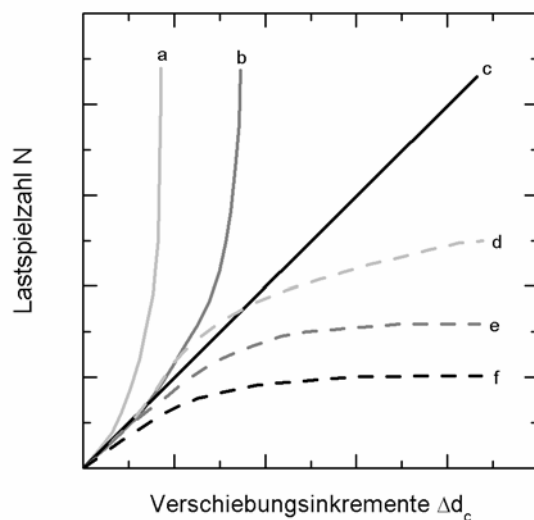


Bild 6.13:

Mögliche Versagensformen, nach Raju (1995)

Min et al. (1995) definieren den Übergang vom stabilen zum instabilen Verhalten beim Erreichen einer nicht näher spezifizierten Absolutverschiebung. Dabei ist zu beachten, dass die Festlegung eines konstanten Absolutwertes den unterschiedlichen Eingangsparametern des Auszugsversuches nicht gerecht wird, da die Materialkombinationen in Abhängigkeit weiterer Parameter wie z.B. der Auflast unterschiedlich sensibel auf Verschiebungen reagieren.

6.5.2 Vorschlag eines modifizierten Versagenskriteriums

Der Vorschlag eines modifizierten Versagenskriteriums basiert auf den maximalen Gesamtverschiebungen im zyklischen Modellversuch, die nicht einem festen Absolutwert entsprechen, sondern in Anlehnung an die Peakverschiebung s_p des statischen Referenzversuches festgelegt werden. Kapitel 4 zeigt dabei deutliche Unterschiede in der Größe von s_p in

Abhängigkeit von statischen Eingangsparametern wie Geokunststoff, Erdstoff oder Auflast. Die Sensibilität des Systems in Hinblick auf die Verschiebungsentwicklung wird durch Definition dieses variablen Kriteriums berücksichtigt.

Die Ermittlung des Versagenszustandes erfolgt dabei jeweils für eine vorgegebene Lastspielzahl, wobei Versuche auch als stabil für diese Lastspielzahl klassifiziert werden können, wenn das Kriterium abnehmender Inkremente nicht erfüllt wird. Dies kann beispielsweise bei bauzeitlichen Belastungen beschränkter Lastspielzahl von Interesse sein. Eine Aussage über die im Versuch aufgebrachten Lastspielzahlen hinaus kann nur mittels eines Extrapolationsverfahrens nach Abschnitt 6.6 getroffen werden. Hierbei ist das Kriterium abnehmender Inkremente einzuhalten.

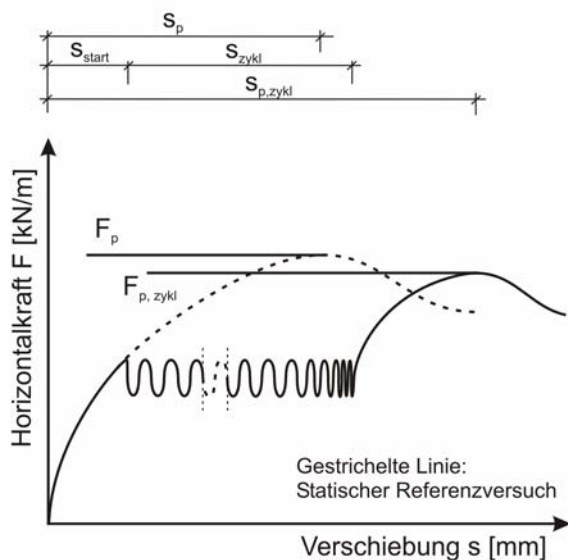


Bild 6.14: Darstellung eines Versagensverhaltens nach dem vorgestellten Versagenskriterium

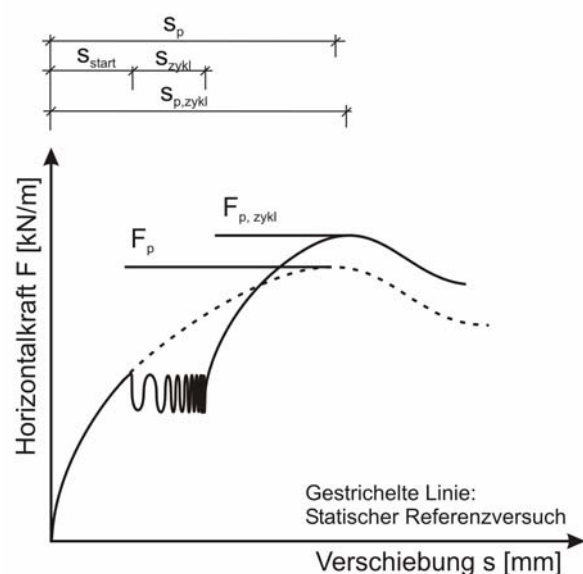


Bild 6.15: Darstellung eines stabilen Verhaltens nach dem vorgestellten Versagenskriterium

Ein Versagen liegt demnach vor, wenn für die aufgebrachte Lastspielzahl an der entsprechenden Messstelle im Vergleich zum statischen Referenzversuch folgende Aussage erfüllt wird:

$$S_{\text{start}} + S_{\text{zykl}} > S_p \quad (6.13)$$

Ein stabiles Materialverhalten liegt vor, wenn für die aufgebrachte Lastspielzahl an der entsprechenden Messstelle im Vergleich zum statischen Referenzversuch folgende Aussage erfüllt wird:

$$S_{\text{start}} + S_{\text{zykl}} < S_p \quad (6.14)$$

Von einem Übergangs- oder indifferenten Verhalten kann unter den oben genannten Bedingungen gesprochen werden, wenn folgende Gleichung zutreffend ist:

$$s_{\text{start}} + s_{\text{zykl}} = s_p \quad (6.15)$$

6.5.3 Überprüfung des vorgeschlagenen Versagenskriteriums

Zur weiteren Unterstützung des vorgeschlagenen Versagenskriteriums werden alle auswertbaren Versuche mit Gittermaterialien im Sand 0/4 herangezogen, da sich Kiesmaterialien aufgrund des Interlockeffektes auch bei großen Verschiebungen weniger versagenskritisch verhalten. Dies zeigt die große Lastabtragungskapazität bei hohen Verschiebungen in den statischen Referenzversuchen. Zur Vergleichbarkeit aller Daten ist eine normalisierte Darstellungsform verwendet worden. Die Auswertung erfolgt auf statistischer Basis, um die Auswirkungen von Datenstreuungen aufgrund von Sattelniveaus der Horizontalkraft im statischen Referenzversuch und Inkonsistenzen der Horizontalkraft zu minimieren.

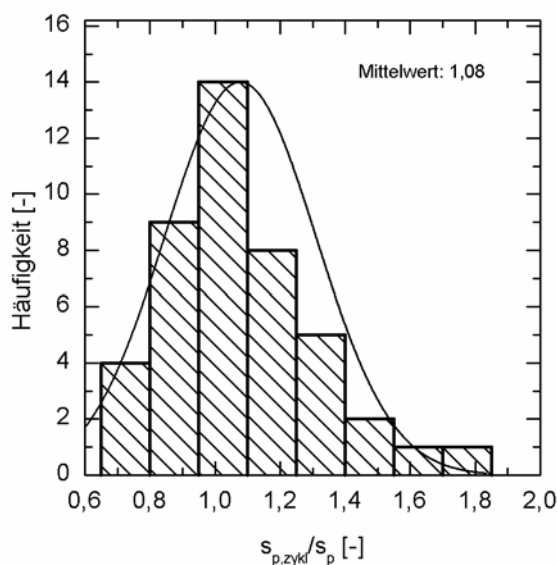


Bild 6.16: Auswertung der Versuchsphase 3 für die zyklischen Modellversuche im Sand 0/4

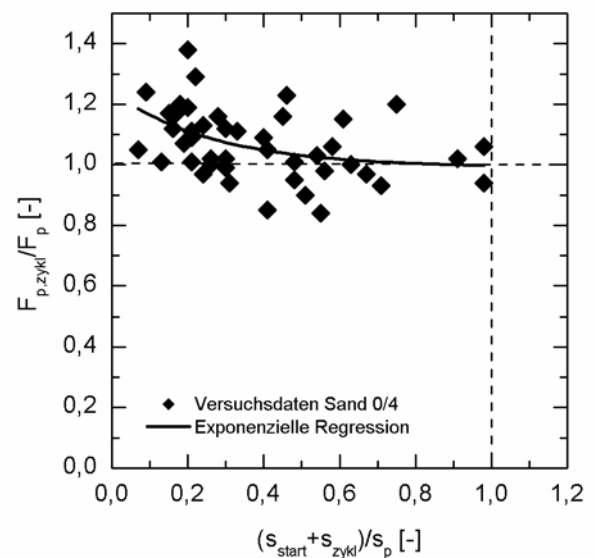


Bild 6.17: Überprüfung des vorgestellten Versagenskriteriums anhand von zyklischen Modellversuchen im Sand 0/4 mit allen untersuchten Gitterstrukturen

Die folgenden Betrachtungen werden an den zyklischen Modellversuchen durchgeführt, bei denen ein statisches Anschlussherausziehen nach Aufbringung der Lastspiele (Phase 3) möglich war. Das Auftreten der maximalen Horizontalkraft in der Phase 3 des zyklischen Modellversuches erfolgt im Mittel bei geringfügig größeren Verschiebungen als beim statischen Referenzversuch (Bild 6.16). Dabei werden größere Verschiebungen der Phase 2

durch einen rapiden Anstieg der Horizontalkraft in der Phase 3 kompensiert (Abschnitt 5.8.5). Trotz dieser Peakverschiebungen wirkt in der Phase 3 in der Regel eine maximale Horizontalkraft, die in der Größenordnung des statischen Referenzversuches angesiedelt ist (Bild 6.17). Dabei wird bei geringeren Verschiebungen in den Phasen 1 und 2 eine maximale Auszugskraft erreicht, die um bis zu 40 % über der maximalen Auszugskraft des statischen Referenzversuches liegt. Es ist davon auszugehen, dass geringe zyklische Belastungen positive Wirkungen wie Verdichtungseffekte erzeugen, die Verschiebungen für negative Einflüsse wie Störungen des Bodenverbundes jedoch noch nicht ausreichend sind. Mit zunehmenden Verschiebungen in den Phasen 1 und 2 nimmt die Erhöhung von F_p in der Phase 3 ab, bis bei einer Größenordnung von s_p in etwa der Wert des statischen Referenzversuches erreicht wird.

Dies bedeutet, dass bei einem Versuch, der bei Erreichen einer Lastspielzahl N eine Verschiebung erreicht, die unterhalb von s_p liegt, davon ausgegangen werden kann, dass im Anschluss mindestens die maximale statische Horizontalkraft F_p aufgebracht werden kann. Dabei können aufgrund einer Verbesserung der Verbundwirkung Verschiebungen $s_{p, \text{zykl}}$ auftreten, die größer als die im statischen Referenzversuch gemessene Peakverschiebung sind. Nehmen die Verschiebungen bei Erreichen der Lastspielzahl N größere Werte als s_p an, so ist nach Bild 6.17 mit geringeren Auszugskräften als F_p zu rechnen.

Aufgrund der Datenstreuungen in Bild 6.17 ist eine quantitative Abhängigkeit von $F_{p, \text{zykl}}$ und der Verschiebung $s_{\text{start}} + s_{\text{zykl}}$ nicht zu definieren. Die Festlegung eines Erhöhungsfaktors in Bereichen geringer zyklischer Belastungen ist damit nur eingeschränkt möglich.

In die im Abschnitt 6.4.2 vorgestellten Verschiebungsnomogramme ist die Verschiebung zum Zeitpunkt der maximalen Horizontalkraft bereits integriert worden. Bei Anwendung des vorgestellten Versagenskriteriums handelt es sich um den Übergang vom stabilen zum instabilen Verhalten.

6.6 Entwicklung einer Methodik zur Extrapolation der Verschiebungen bei höheren Lastspielzahlen

6.6.1 Anwendungsbereiche einer Extrapolation

Bei Nutzungsdauern geokunststoffbewehrter Stützkonstruktionen von über 100 Jahren liegen Lastspielzahlen von mehr als 10^7 im realitätsnahen Anwendungsbereich. Unter Zugrundelegung der angegebenen Lebensdauer bedeuten 10^7 Lastspiele das Auftreten von 274 Lastspielen am Tag. Für den Nachweis entsprechender zyklischer Belastungen stehen nur zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

1. Versuchsdurchführung im Zeitrafferverfahren durch Erhöhung der Versuchsfrequenz,
2. Versuchsdurchführung mit einer reduzierten Lastspielzahl und Extrapolation der Versuchsdaten.

Eine Frequenzerhöhung kann dabei zu Problemen aufgrund des visko-elastischen Materialverhaltens und der Temperaturerhöhung des Probekörpers führen.

Das Extrapolationsverfahren bietet die Möglichkeit, die Versuchsdauer und damit die Versuchskosten zu reduzieren. Dabei muss jedoch die Qualität der Prognose gewährleistet sein.

6.6.2 Prognose der Verschiebungen für höhere Lastspielzahlen

Eine Aussage über das Verschiebungsverhalten ist sinnvoll nur über eine Extrapolation um maximal eine Zehnerpotenz der gemessenen Daten zu treffen. Da die Regelversuche mit 10^4 Lastspielen durchgeführt worden sind, kann eine Datenabschätzung nur bis zu einer maximalen Lastspielzahl von 10^5 Lastspielen vorgenommen werden.

Für die Verformungsextrapolation werden die Verschiebungsinkremente des zyklischen Modellversuches in der Datenqualität der Stufe 4 gemäß Tabelle 5.1 herangezogen (siehe Bild 5.2). Für eine aussagekräftige Extrapolation ist dabei auf eine stetige Abnahme der Inkremente, die auf ein stabiles Verhalten hindeutet, sowie auf eine konsistente Datenstruktur zu achten. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, lassen sich die Verschiebungsinkremente in der Regel in guter Näherung durch eine Regressionsfunktion entsprechend Gleichung (6.16) abbilden.

$$\Delta s_{i,n} = \beta_{1,i} \cdot n^{\beta_{2,i}} \quad (6.16)$$

mit: $\Delta s_{i,n}$ = Verschiebungsinkrement an der Wegmessstelle i bei n Lastspielen
 n = Lastspielzahl
 $\beta_{1,i}; \beta_{2,i}$ = Regressionskoeffizienten zur Ermittlung des Verlaufes der Verschiebungsinkremente

Es ist zu beachten, dass die Verläufe der Verschiebungsinkremente häufig eine bilineare Struktur zeigen, da das System in der Anfangsphase der zyklischen Lastaufbringung tendenziell eine geringere Inkrementabnahme als im weiteren Versuchsablauf zeigt. Aus diesem Grunde erhöht die Durchführung getrennter Regressionen bis zu einer Lastspielzahl von 10^3 und im Anschluss bis zu einer Lastspielzahl von 10^4 in der Regel die Qualität der Regressionsfunktionen.

$$\bar{s}_{i,10^5} = s_{i,10^3} + \int_{n=10^3}^{n=10^5} \beta_{1,i} \cdot n^{\beta_{2,i}} \quad (6.17)$$

mit: $\bar{s}_{i,10^5}$ = Extrapolierte Verschiebungen an Wegaufnehmer i bei 10^5 Lastspielen

$s_{i,10^3}$ = Gemessene Verschiebungen an Wegaufnehmer i bei 10^3 Lastspielen

Im vorgestellten Fall des Regelversuches ist für die Integration der Verschiebungsinkremente von 10^3 bis 10^5 Lastspielen die aus den Versuchsdaten ermittelte Regressionsfunktion von 10^3 bis 10^4 Lastspielen zu verwenden.

Das vorgestellte Verfahren zur allgemeinen Durchführung der Extrapolation von Regelversuchen mit einer Lastspielzahl von 10^4 ist der Gleichung (6.17) zu entnehmen. Für eine festgelegte Wegmesssstelle wird den Versuchsdaten demnach die Verschiebung bei 10^3 Lastspielen entnommen. Anschließend wird eine Integration von 10^3 bis 10^5 Lastspielen über die Regressionsfunktion der Verschiebungsinkremente im Bereich von 10^3 bis 10^4 Lastspielen vorgenommen und die sich ergebende Verschiebung aufaddiert. Somit ergibt sich die prognostizierte Gesamtverschiebung nach 10^5 Lastspielen.

Es ist zu beachten, dass bei Anwendung der Gleichung (6.17) Einflüsse aus Kriechverformungen im Bereich von 10^4 bis 10^5 Lastspielen nicht exakt abgebildet werden können. Entsprechende Anteile werden beim vorgestellten Verfahren implizit berücksichtigt, da sie in den Verschiebungsinkrementen bis 10^4 bereits enthalten sind. Diese Methodik liegt auf der sicheren Seite, da die Kriecheinflüsse nach Bild 2.29 mit zunehmender Belastungszeit abnehmen.

Das vorgestellte Extrapolationsverfahren lässt sich bei Vorlage einer Datenbasis zyklischer Modellversuche mit 10^5 Lastspielen ohne grundlegende Modifikationen auch für eine Extrapolation der Verschiebungsentwicklung bei 10^6 Lastspielen verwenden.

Die im Bild 5.13 dargestellten Versuche mit 10^5 Lastspielen zeigen, dass aufgrund der unterschiedlichen Verhaltensweisen des Systems bei höheren Lastspielzahlen eine Extrapolation beliebiger Versuchsdaten nicht zielführend ist. Die Definition von Prüfkriterien zur Ausfilterung von Versuchen, die die Extrapolationsvoraussetzungen nicht erfüllen, ist daher zwingend notwendig.

6.6.3 Definition von Prüfkriterien für die Prognose

Zur Festlegung der Eignung eines zyklischen Modellversuches zu Extrapolationszwecken werden vier Prüfkriterien vorgeschlagen. Der genaue Ablauf der Extrapolation ist einem Ablaufdiagramm in Anhang F.8 zu entnehmen.

Kriterium 1

Existenz eines Versagenszustandes bei 10^4 Lastspielen

$$s_{i,10^4} < s_{p,i} \quad (6.18)$$

Tritt bereits ein Versagen des zyklischen Modellversuches bis zum Erreichen der maximalen Lastspielzahl des Versuches auf, so ist keine Verschiebungsextrapolation möglich. Die Einwirkungsparameter dieses Versuches führen auch bei höheren Lastspielzahlen zu einem Versagen.

Kriterium 2

Verschiebungsabweichung der extrapolierten Werte bei 10^4 Lastspielen

$$0,95 \cdot s_{i,10^4} \leq s_{i,10^3} + \int_{n=10^3}^{n=10^4} \beta_{1,i} \cdot n^{\beta_{2,i}} \leq 1,05 \cdot s_{i,10^4} \quad (6.19)$$

Die Qualität der Regressionsfunktion wird durch einen Vergleich der berechneten Verschiebungen mit den gemessenen Verschiebungen bei Erreichen der maximalen Lastspielzahl des zyklischen Modellversuches überprüft. Gibt es hier Abweichungen von mehr als 5 %, so wird die Extrapolation aufgrund ihrer Ungenauigkeit verworfen.

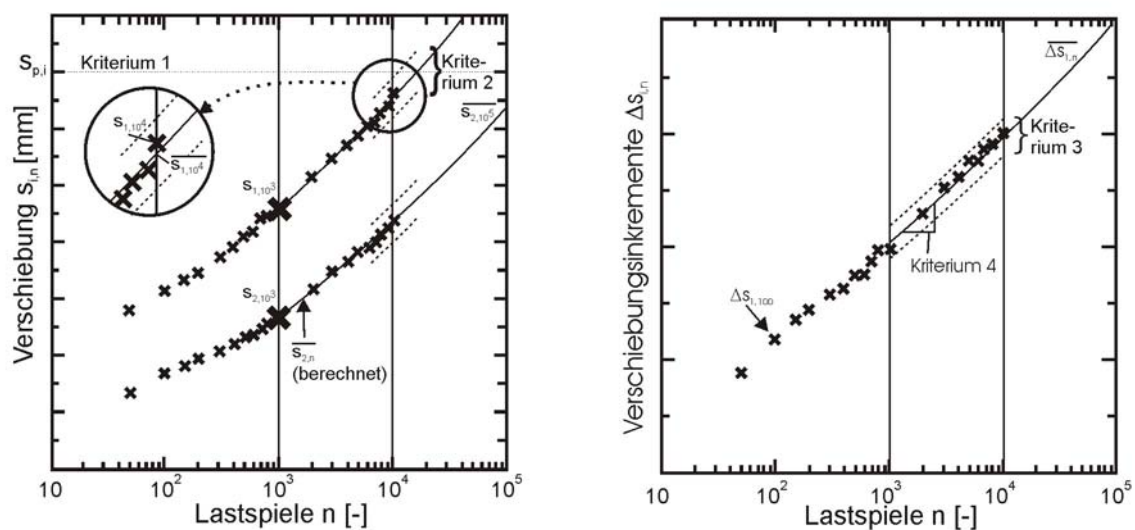


Bild 6.18: Überprüfung der Zulässigkeit einer Datenextrapolation mit vier Kriterien

Kriterium 3

Qualität der gewählten Regressionsfunktion der Verschiebungsinkremente

$$R_i^2 \geq 0,75 \quad (6.20)$$

Über den Regressionskoeffizienten können Aussagen zu Schwankungen der gemessenen Verschiebungsinkremente und die Qualität ihrer Abbildung durch die gewählte Regressionsfunktion getroffen werden. Kommt es zu großen Unregelmäßigkeiten z.B. aufgrund starker Versuchsinkonsistenzen, so ist von einer Extrapolation abzusehen.

Kriterium 4

Steigung der gewählten Regressionsfunktion

$$\beta_{2,i} < -0,25 \quad (6.21)$$

Kommt es nur zu einer sehr geringen Abnahme der Verschiebungsinkremente im Bereich der betrachteten Regression, so ist nicht von einem stabilen Verhalten auszugehen. Als Indikator für dieses Kriterium wird der Exponent der Regressionsfunktion herangezogen.

Werden die vorgeschlagenen Kriterien von einzelnen Versuchen nicht erfüllt, kann nach einer ingenieurmäßigen Beurteilung der Versuchsergebnisse trotzdem eine zielführende Extrapolation durchgeführt werden. Dies kann insbesondere dann der Fall sein, wenn nur ein Kriterium nicht erfüllt wird.

6.6.4 Visualisierung der Verschiebungen für 10^5 Lastspiele

Anhand von zwei ausgewählten zyklischen Modellversuchen mit 10^5 Lastspielen sollen die unterschiedlichen Qualitäten der Extrapolation in Abhängigkeit der Datenqualität veranschaulicht werden. Es ist zu beachten, dass die Datenqualität bei diesen Versuchen aufgrund der hohen Lastspielzahlen und damit verbundener niedrigerer Datenaufzeichnungsfrequenzen geringer ist als beim Regelversuchsablauf. Daher können die in Abschnitt 6.6.3 vorgestellten Überprüfungskriterien bei diesen Versuchen auch nur eingeschränkt angewendet werden.

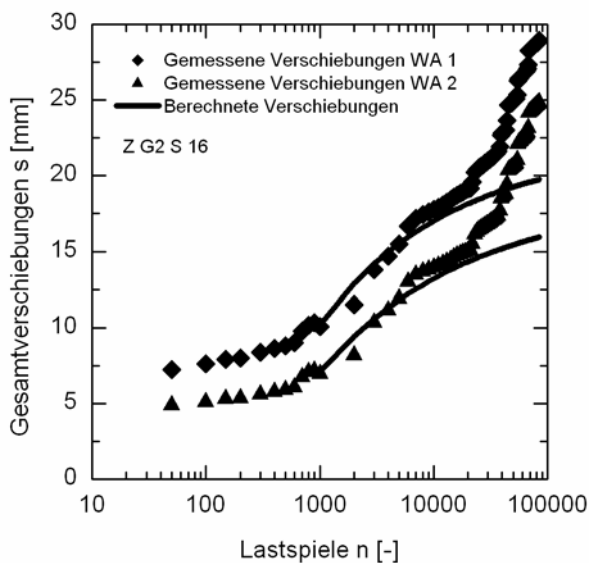


Bild 6.19: Beispiel einer unzureichenden Abbildung der gemessenen Verschiebungen durch die Extrapolationsbeziehung

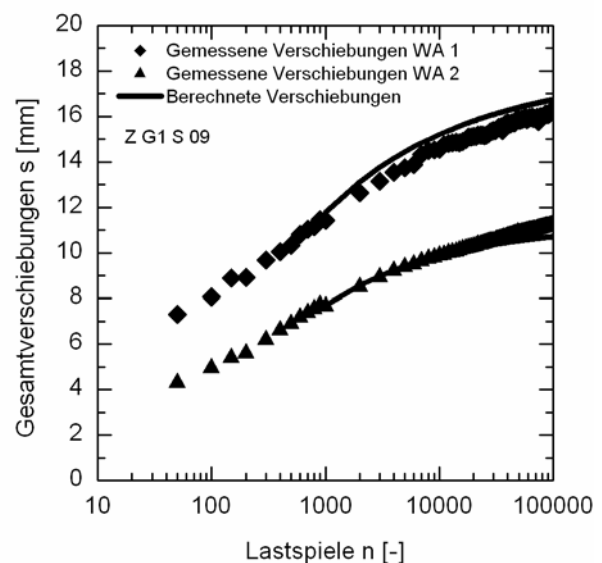


Bild 6.20: Beispiel einer sehr guten Abbildung der gemessenen Verschiebungen durch die Extrapolationsbeziehung

Die in Bild 6.19 auftretenden Diskrepanzen zwischen gemessenen und berechneten Verschiebungen sind vor allem auf die verhältnismäßig hohe Auslastung dieses Versuches und die Besonderheiten des Materials des Geogitters G2 zurückzuführen. Dadurch kommt es zu

nicht prognostizierbaren, plötzlichen Verschiebungszunahmen bei Inkonsistenzen der Horizontalkraft, die durch das Modell nicht abgedeckt werden können. Entsprechende Versuche werden durch das Prüfkriterium 3 aufgrund eines ungünstigen Bestimmtheitsmaßes in der Regel ausgefiltert.

Der in Bild 6.20 vorgestellte Versuch des Geogitters G1 zeigt dagegen eine sehr gute Abbildung der gemessenen Verschiebungen durch die extrapolierten Daten. Aufgrund der Verhaltensmuster des Geogitters G1 sind die Inkonsistenzen bei diesem zyklischen Modellversuch marginal.

Abbildungsdifferenzen von einigen Millimetern sind bei dem vorgestellten Verfahren in Betracht des Prognosezeitraumes als sehr gute Annäherung der Versuchsergebnisse aufzufassen.

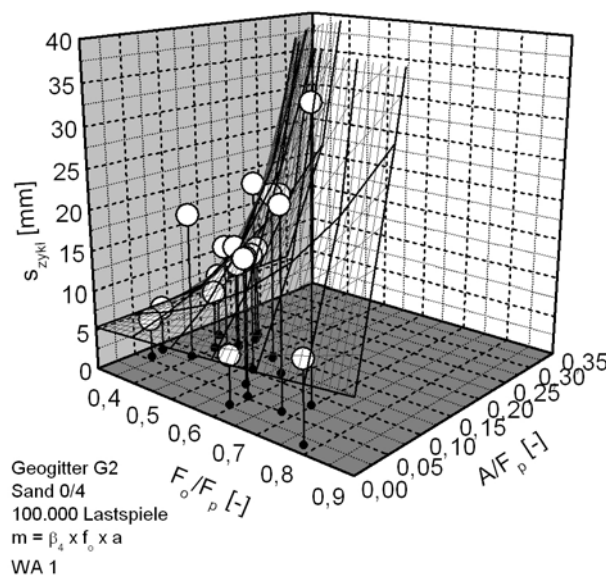


Bild 6.21:

Extrapolierte zyklische Verschiebungen des Geogitters G2 nach 100.000 Lastspielen

Die durch die Extrapolationsmethode gewonnenen zyklischen Verschiebungen nach 10^5 Lastspielen sind für die nach Abschnitt 6.6.3 verwendbaren Versuche aus dem Datensatz des Geogitters G2 in Sand 0/4 im Bild 6.21 dargestellt. Es zeigt sich im Vergleich zu Bild 6.4 ein deutlich stärkerer Einfluss des Oberlastniveaus und vor allem der Amplitude auf die zyklischen Verschiebungen bei einem insgesamt höheren Verschiebungsniveau. Verfahrensbedingt ergibt sich eine größere Varianz der Versuchsergebnisse, so dass bei extrapolierten Ergebnissen von einer exakten Verschiebungsaussage Abstand genommen und lediglich eine Aussage zu einem eventuellen Versagenszustand vorgenommen werden sollte.

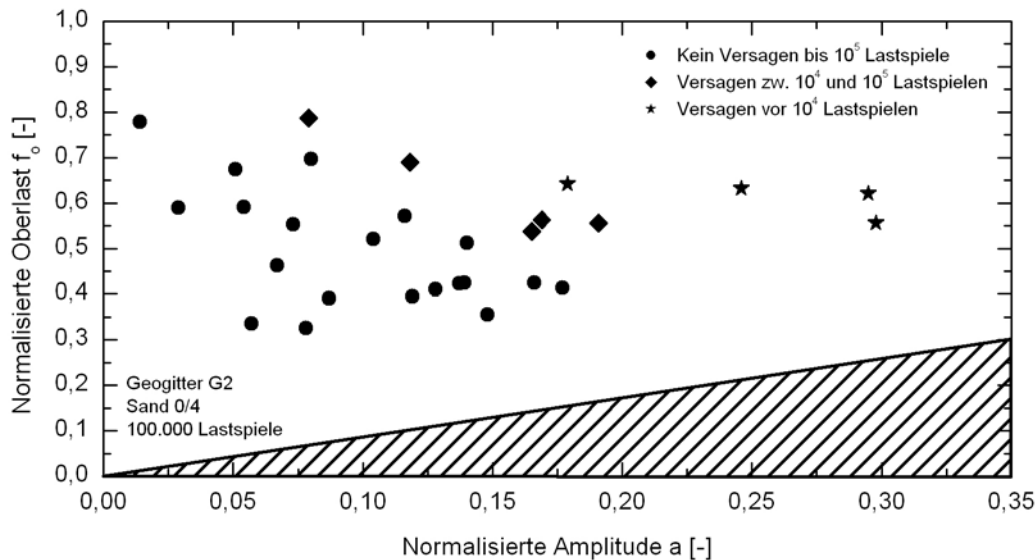


Bild 6.22: Extrapoliertes Versagensverhalten zyklischer Modellversuche bei Geogitter G2

Die Konsistenz der extrapolierten Daten bezüglich einer Versagensaussage in Bild 6.22 bestätigt die Anwendbarkeit des vorgestellten Verfahrens. Es ergibt sich ein Bereich geringer Auslastung, bei dem auch nach 10^5 Lastspielen kein Versagen entsprechend des in Abschnitt 6.5 definierten Versagenskriteriums auftritt. An diesen Bereich schließt sich bei höheren Oberlastniveaus bzw. Amplituden ein Band an Versuchsergebnissen an, die zwischen 10^4 und 10^5 Lastspielen versagen, während eine weitere Erhöhung der Amplitude zu Versagensfällen vor Erreichen von 10^4 Lastspielen führt. Entsprechende Nomogramme für die Geogitter G1 und G3 sind dem Anhang F.8 zu entnehmen. Es ergibt sich ein vergleichbarer Übergang vom Versagenszustand in den stabilen Bereich, wobei das Band des Versagens zwischen 10^4 und 10^5 Lastspielen ebenfalls schmal ist. Dies deutet auf einen geringen Einfluss der Lastspielzahl auf die Verschiebungen im Bereich höherer Lastspielzahlen hin.

6.7 Diskussion und Bewertung der vorgestellten Auswertemethoden

In den Abschnitten 6.2 bis 6.4 ist eine Methode zur stufenlosen Abschätzung der Verformungsentwicklung in Abhängigkeit der Amplitude, des Oberlastniveaus und der Lastspielzahl entwickelt worden. Dabei zeigten sich Parallelen in der Verformungsentwicklung der unterschiedlichen Materialkombinationen, wobei es jedoch zu Unterschieden in bestimmten Bereichen hoher Oberlastniveaus und Amplituden kam. Des Weiteren zeigten Kiesversuche bei höheren Amplitudenbelastungen größeres Verformungspotenzial als vergleichbare Sandversuche.

Eine Verallgemeinerung der Daten ist aufgrund der Komplexität des Verbundmechanismus nur mit Einschränkungen möglich. Es wurde eine einfache Gleichung für Sand und Kies vor-

gestellt, mit der in Abhängigkeit des Oberlastniveaus und der Amplitude eine erste Abschätzung der Verformungen durchgeführt werden kann.

Versuchsreihen mit unterschiedlichen zyklischen Belastungsparametern oder zumindest einzelne Versuche mit definierten Eingangsparametern sollten jedoch zu Verformungsaussagen bei besonders verformungssensiblen Bauvorhaben herangezogen werden.

Um aus den verformungsbasierten Daten eine Aussage zum Grenzverhalten des Systems ableiten zu können, wurde das Versagenskriterium definiert und die Anwendbarkeit unter Zuhilfenahme der Versuchsdaten nachgewiesen. Durch die konkrete Festlegung des Versagenszustandes wird eine Bemessung des Systems ermöglicht. Die weitergehende Anwendung des Versagenskriteriums und vereinfachte Bemessungsvorschläge werden in Kapitel 7 vorgestellt.

Das Verfahren der Datenextrapolation ermöglicht Aussagen über das Systemverhalten bei höheren Lastspielzahlen und damit längeren Lebensdauern. Aufgrund von Versuchsschwankungen und Inkonsistenzen der Horizontalkraft sind umfangreiche Datenüberprüfungen zur Absicherung erforderlich. Die Anwendbarkeit des Verfahrens ist prinzipiell bei jedem zyklischen Modellversuch gegeben. Berechnete Daten können für weitere Auswertungen herangezogen werden.

Da es sich um generierte und nicht um gemessene Daten handelt, ist der Ansatz einer zusätzlichen Sicherheit zu erwägen. Die Auswertung mehrerer Datensätze erhöht dabei die Abschätzung der Qualität der jeweiligen Prognosen.

Bisher vorgestellte Methoden dienen in der Regel der Auswertung und Analyse einer großen Anzahl zyklischer Modellversuche. Da die entsprechende Versuchsdurchführung extrem zeit- und kostenaufwändig ist, müssen Methoden zur vereinfachten Abschätzung von Versagenszuständen entwickelt werden. Entsprechende Vorschläge werden in Kapitel 7 vorgestellt.

7 Entwicklung eines Bemessungskonzeptes

7.1 Einführung

Ziel dieses Kapitels ist die Überführung der vorgestellten Versuchsergebnisse in ein allgemeingültiges Bemessungskonzept im Grenzzustand der Tragfähigkeit. Der Fokus liegt dabei auf der Ermittlung einer optimalen Einbindelänge der Bewehrungselemente für bekannte statische und zyklische Einwirkungen in jeder Tiefenlage, so dass der Anwender mit minimiertem Versuchsaufwand und begrenzten versuchstechnischen Detailkenntnissen eine einfache zyklische Bemessung durchführen kann. Besondere Aufmerksamkeit wird dabei auf die Entwicklung entsprechender Bemessungsansätze und ihre exemplarische Anwendung gelegt.

Zur Verständnisoptimierung der überwiegend zur Anwendung kommenden Nomogramm-Darstellungsform der Versuchsergebnisse veranschaulicht Bild 7.1 die Belastungsdaten einiger exemplarisch ausgewählter Versuche.

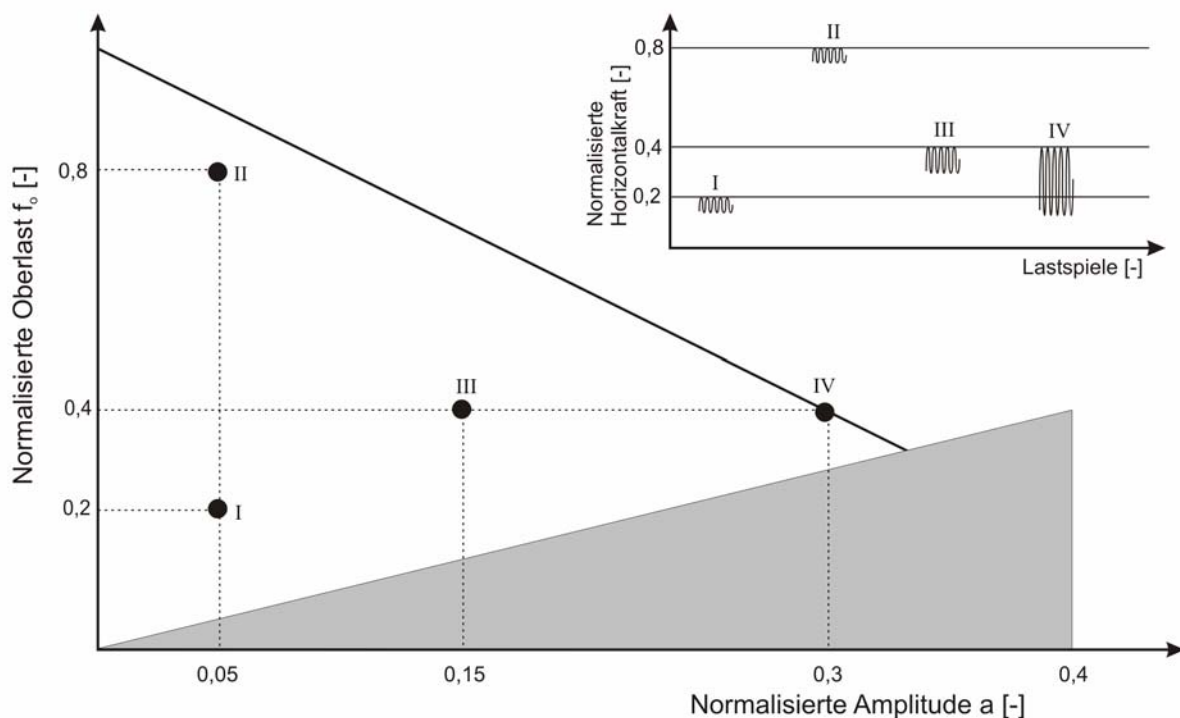


Bild 7.1: Zyklisches Beanspruchungsverhalten an verschiedenen Nomogrammpunkten

7.2 Entwicklung einer allgemeingültigen Versagensbeziehung

7.2.1 Parameter mit Einfluss auf das Versagensverhalten

Die Anwendung des Versagenskriteriums (Abschnitt 6.5) definiert für jeden Versuch bei jeder beliebigen Lastspielzahl einen stabilen oder instabilen Zustand des Verbundsystems. Für

10.000 Lastspiele zeigt Bild 7.2 das entsprechende Materialverhalten für beliebige Gittermaterialien in Sand 0/4 und Kies 2/12: In einem großen Bereich geringer Amplituden und geringer Oberlasten ist ein stabiler Bereich zu beobachten. Bei Steigerung dieser Einflussparameter kommt es zu einem Übergang in ein instabiles Verhalten. Aufgrund unterschiedlicher Versuchsmaterialien und Streuungen der Versuchsergebnisse ist dieser Bereich als „Übergangsband“ zwischen stabilem und instabilem Materialverhalten zu beschreiben. Es zeigt sich, dass durch die Normalisierung auf die statische Auszugskraft F_p Versuche unterschiedlicher Erdstoffe trotz variierender Kernparameter s_p und F_p vergleichbare Ergebnisse liefern. Bei höheren Amplituden gibt es hingegen Differenzen des Verhaltens zwischen verschiedenen Gittermaterialien im Sand 0/4. Eine detaillierte Unterscheidung der Bewehrungsmaterialien (Bild 7.3) zeigt ein deutlich stabileres Verhalten der Geogitter G1 und G3 (unabhängig vom Querstrebenanteil) in diesem Bereich. Es kann postuliert werden, dass die Materialgeometrie der entsprechenden Geogitter optimal auf die zyklische Belastung im Sand 0/4 abgestimmt ist, während Geogitter G2 eine zu geringe und das Stahlgitter eine zu große Öffnungsfläche besitzt. Weiterhin ist zu vermuten, dass der in Abschnitt 5.8.5 als „zyklische Bodenverspannung“ bezeichnete Effekt abhängig von der Dehnsteifigkeit der Bewehrungsmaterialien ist und sich damit in unterschiedlich starker Form auswirkt.

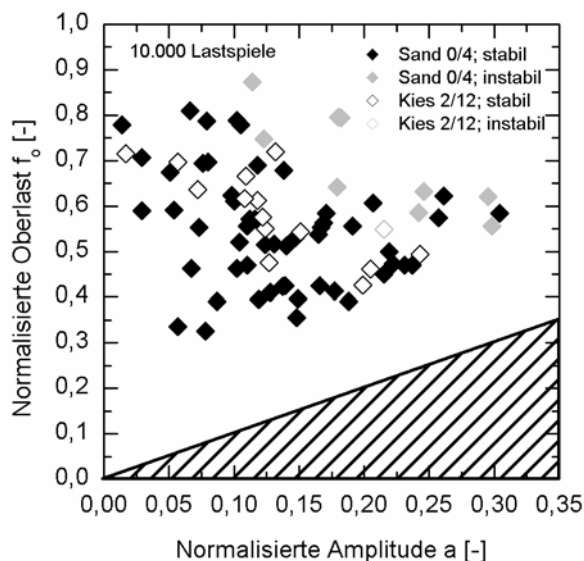


Bild 7.2: Versagensverhalten der Gittermaterialien in Sand 0/4 und Kies 2/12 im Vergleich

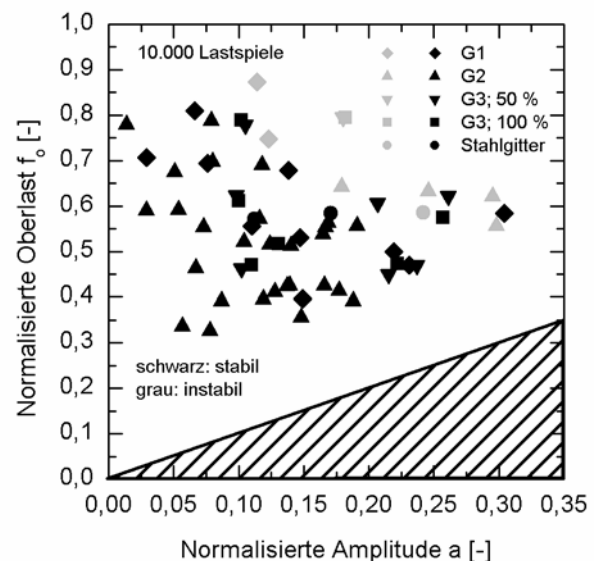


Bild 7.3: Versagensverhalten der untersuchten Gittermaterialien im Vergleich

Insgesamt ist im zyklischen Versagensverhalten der durchgeführten zyklischen Modellversuche eine Allgemeingültigkeit zu beobachten, die es erlaubt, die Versuchsergebnisse unabhängig vom verwendeten Erdstoff und Bewehrungsmaterial als Gesamtheit zu betrachten.

7.2.2 Festlegung einer allgemeingültigen Versagensgrenze für die ausgeführten zyklischen Modellversuche

In Bild 7.4 ist die Gesamtheit der durchgeführten zyklischen Modellversuche bei einer Lastspielzahl von $n = 10.000$ dargestellt. Als allgemeingültige Versagensbeziehung, die stabile und instabile Versuche voneinander trennt, wird eine Versagensgerade nach Gleichung (7.1) vorgeschlagen.

$$\frac{F_o}{F_p} = \eta_1 - \eta_2 \cdot \frac{A}{F_p} \quad (7.1)$$

mit: $\eta_i =$ Konstanten zur Beschreibung der Versagensgerade

Die Verwendung dieser Beziehung liegt für die vorgestellte Lastspielzahl auf der sicheren Seite, da alle aufgetretenen Versagensfälle außerhalb des durch die lineare Versagensbeziehung begrenzten stabilen Bereiches liegen, während aber stabile Versuchsergebnisse innerhalb des instabilen Bereiches anzutreffen sind. Insbesondere bei höheren Amplituden ist es aufgrund der in Abschnitt 7.2.1 vorgestellten Problematik möglich, dass das tatsächliche Materialverhalten positiver als das durch die Versagensbeziehung definierte Verhalten ist. Im Falle des Geogitters G3 ist anzumerken, dass keine offensichtlichen Unterschiede zwischen dem Regelprodukt und dem Versuchsmaterial mit einem Querstrebenanteil von 50 % zu erkennen sind. Für die weiteren theoretischen Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass Punkte, die sich genau auf der Versagensgeraden befinden, mit einer zyklischen Gesamtverschiebung der Größenordnung s_p in ein Versagensverhalten übergehen.

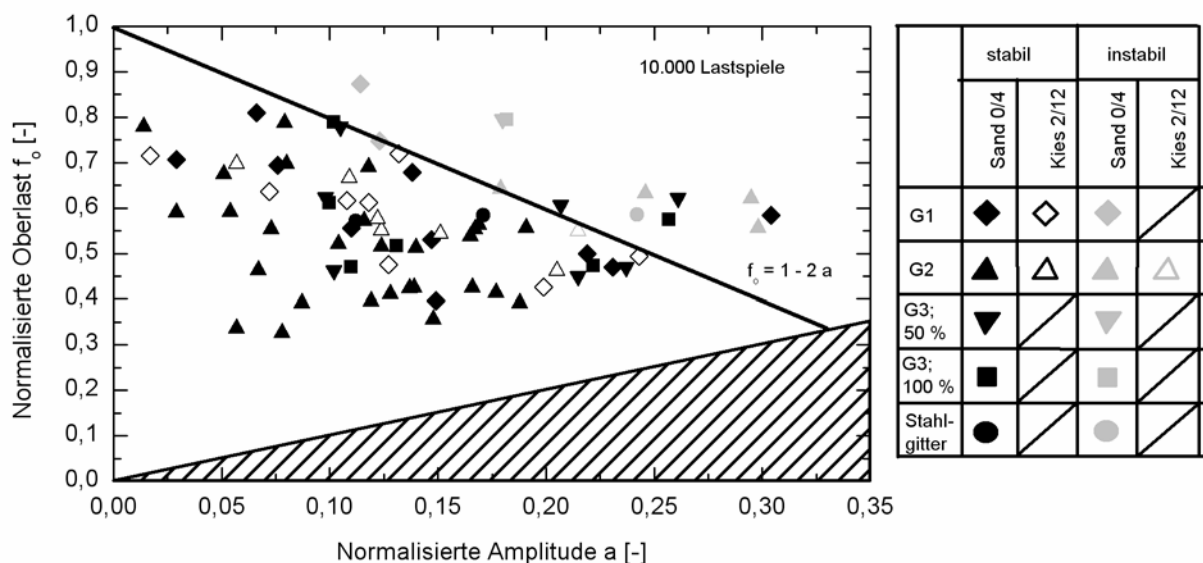


Bild 7.4: Zusammenstellung des Versagensverhaltens aller zyklischen Modellversuche bei 10.000 Lastspielen mit Definition einer allgemeingültigen Versagensbeziehung

Da das Versuchsprogramm hinsichtlich der Aussagekraft der zyklischen Modellversuche bei einer Lastspielzahl von 10.000 Zyklen optimiert worden ist, liegen für 1.000 Lastspiele nur sehr vereinzelt Punkte mit einem Versagen des Geokunststoffmaterials vor (Bild 7.5). In Verbindung mit überlagernden Versuchsschwankungen der Versuchsphase 1, die sich bei geringen Lastspielzahlen stärker auswirken, kann keine einheitliche Versagensbeziehung definiert werden. Aufgrund der geringen Praxisrelevanz dieser Lastspielzahl wird dieser Fall im weiteren Verlauf nicht weiter betrachtet.

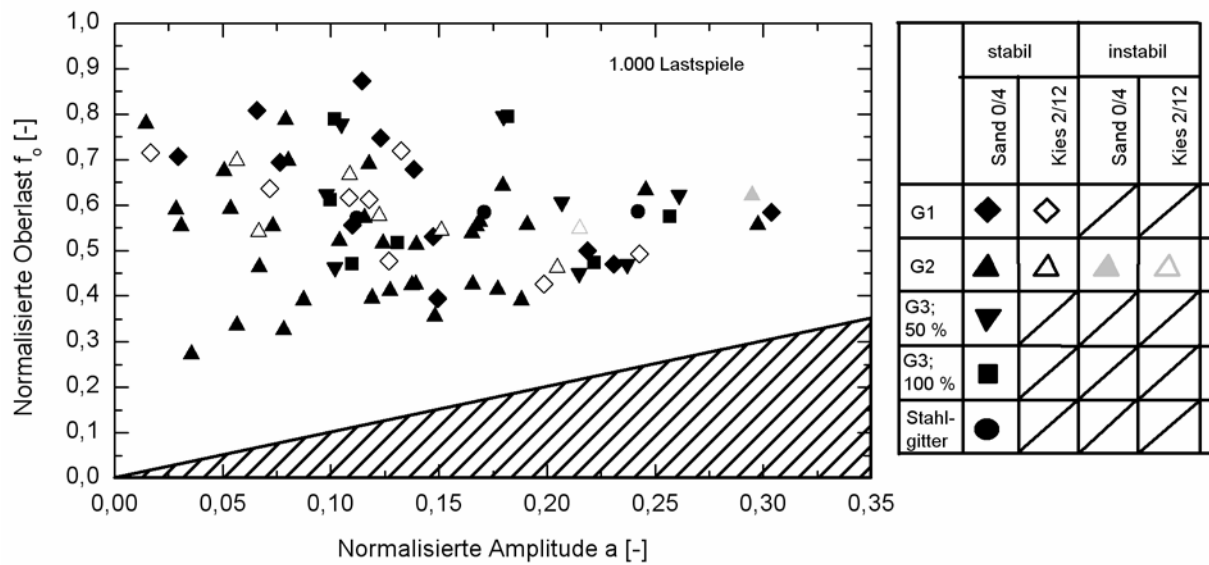


Bild 7.5: Zusammenstellung des Versagensverhaltens aller zyklischen Modellversuche bei 1.000 Lastspielen

Die entsprechend der in Abschnitt 6.6 vorgestellten Extrapolationsmethodik ermittelten Ergebnisse sind in Bild 7.6 zusammengestellt worden. Auch hier kann die in Gleichung (7.1) hergeleitete Versagensbeziehung in guter Näherung auf die Datenbasis angewendet werden, wobei der Übergang in einen Versagenszustand bei geringeren Amplituden und Oberlasten vollzogen wird. Auffällig ist, dass Geogitter G3 bei höheren Beanspruchungen ein stabileres Verhalten aufweist als die Vergleichsmaterialien. Es kann postuliert werden, dass dieses Verhalten auf die insgesamt geringen Verschiebungen während der Phase 2 und damit auf eine für die zyklische Beanspruchung optimierte Kombination aus Erdstoff und Bewehrungsmaterial zurückzuführen ist.

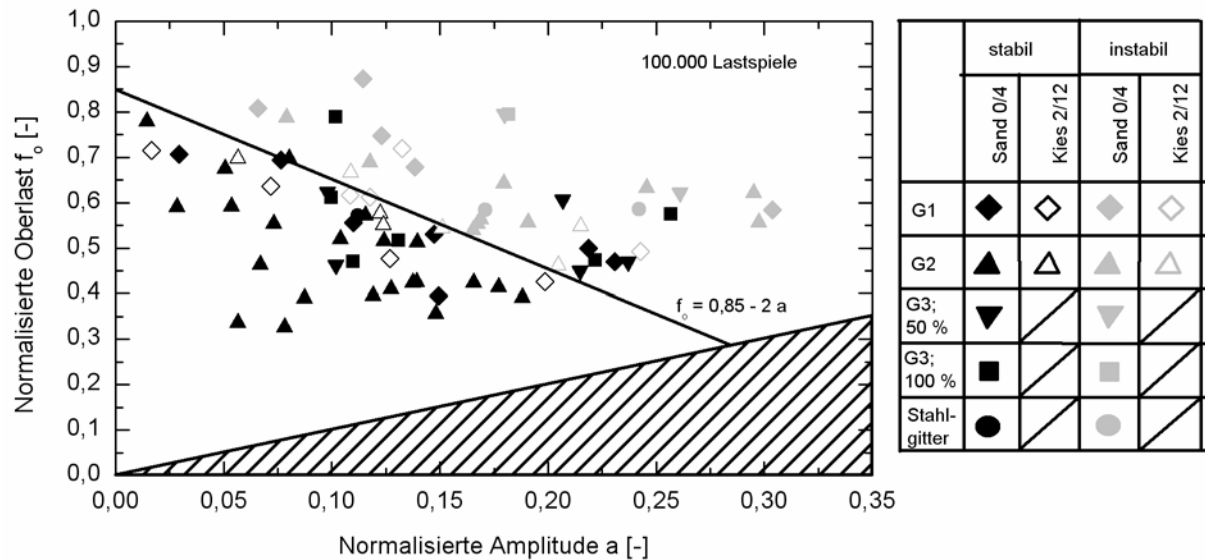


Bild 7.6: Zusammenstellung des extrapolierten Versagensverhaltens aller zyklischen Modellversuche bei 100.000 Lastspielen mit Definition einer allgemeingültigen Versagensbeziehung

Es zeigt sich, dass die Zusammenfassung einer breiten Datenbasis aus Versuchen unterschiedlicher Eingangsparameter zur Definition einer linearen Versagensbeziehung möglich ist. Es ist jedoch möglich, dass durch produktspezifische Untersuchungen deutlich günstigere Versagensgeraden ermittelt werden können, die zu ökonomisch optimalen Bemessungsergebnissen führen.

7.3 Entwicklung eines Verfahrens zur zyklischen Bemessung des Verbundverhaltens

7.3.1 Zielformulierung

Ziel des Verfahrens zur zyklischen Bemessung des Verbundverhaltens ist es, eine konkrete Aussage zum Zeitpunkt des Erreichens eines instabilen Zustandes in jeder Tiefenlage treffen zu können. Bei vorgegebener Tiefenlage und damit konstanter Auflastspannung lässt sich dieser Grenzzustand durch eine Optimierung der Einbindelänge des Bewehrungsmaterials erreichen. Dieser Optimierungsprozess muss für jede Bewehrungslage getrennt durchgeführt werden. Es ist daher erforderlich, den statischen Referenzparameter F_p in Abhängigkeit der Einbindelänge l und der Auflastspannung σ zu ermitteln. Dazu stehen das allgemeine „Abschätzverfahren“ mit Verwendung eines Verbundbeiwertes oder das exaktere „versuchsbasierte Verfahren“ zur Verfügung (Abschnitt 7.3.3). Als Berechnungsverfahren werden das „Nomogramm-“ und das „analytische Verfahren“ vorgestellt, wobei sich das Nomogrammverfahren für eine optisch übersichtliche Handrechnung eignet, während das analytische

Verfahren in vorhandene Programme bzw. Bemessungssysteme integriert werden kann. Eine grundlegende Übersicht über das Vorgehen bei einer zyklischen Bemessung des Verbundverhaltens gibt Bild 7.7.

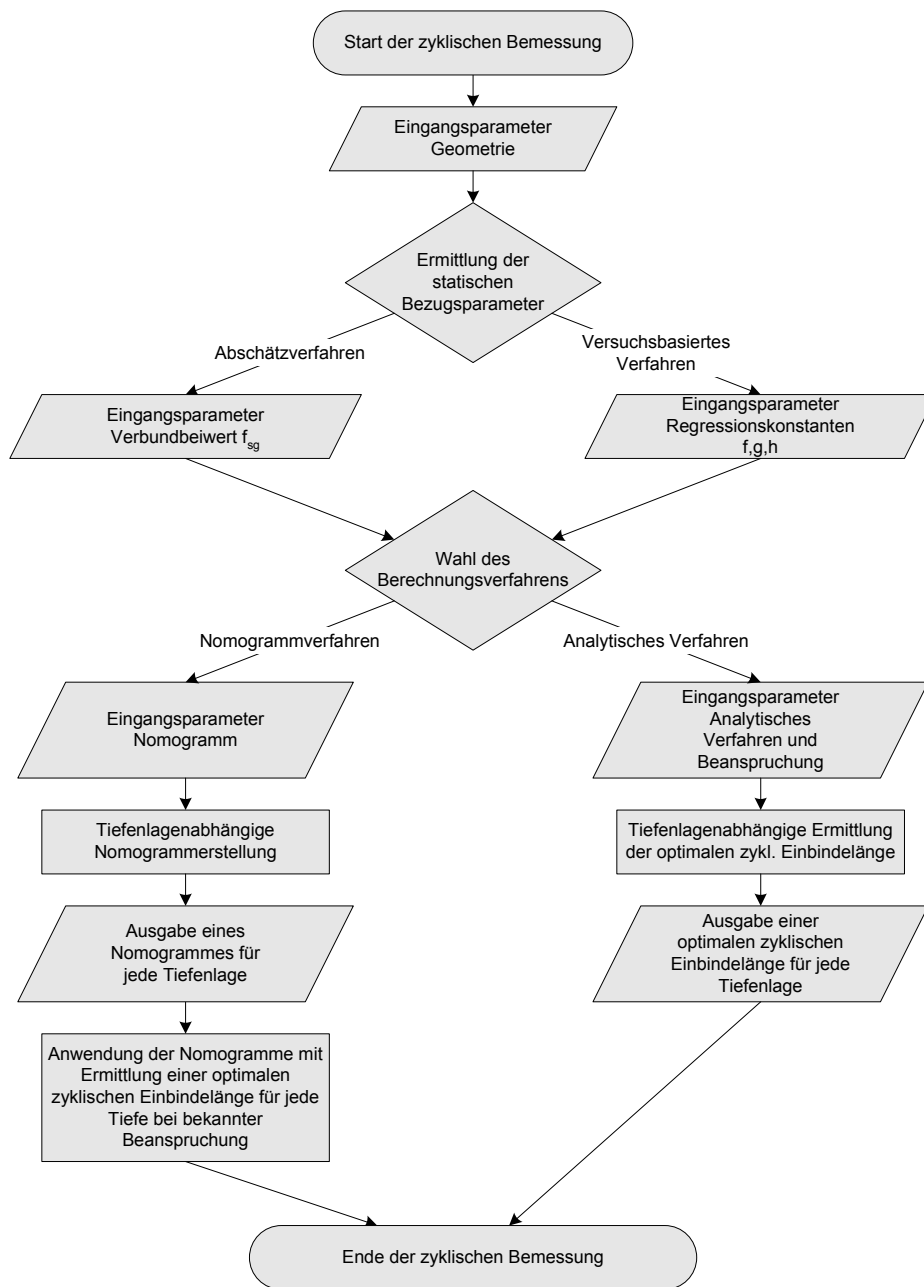


Bild 7.7: Allgemeiner Ablauf einer zyklischen Bemessung des Auszugsverhaltens

7.3.2 Ermittlung der Versagensgrenze

Um die Anwendbarkeit des Bemessungsverfahrens zu gewährleisten, ist eine lineare Versagensbeziehung in Abhängigkeit der normalisierten Amplitude und des normalisierten Oberlastniveaus zu wählen (Abschnitt 7.2.2). Alle aufgestellten Versagensbeziehungen gelten dabei nur für eine bestimmte Lastspielzahl.

Es stehen im Wesentlichen drei Methoden zur Aufstellung einer Versagensbeziehung zur Verfügung:

a. Allgemeine Versagensgerade

Es wird die Versagensgerade aus Abschnitt 7.2.2 verwendet. Dabei ist zu prüfen, ob diese Versagensbeziehung auf den aktuellen Fall angewendet werden kann. Auf die Durchführung zyklischer Modellversuche kann verzichtet werden. Dafür wird eine Gerade gewählt, die für die aktuelle Kombination aus Erdstoff und Bewehrungsmaterial deutlich auf der sicheren Seite liegen kann.

b. Allgemeine Versagensgerade mit Unterstützung *eines* Punktes aus einem zyklischen Modellversuch

Es wird die Versagensgerade aus Abschnitt 7.2.2 verwendet. Dabei ist zu prüfen, ob diese Versagensbeziehung auf den aktuellen Fall angewendet werden kann. Ein Zusatzversuch dient zur Absicherung der Geraden an einer neuralgischen Stelle, z.B. im Bereich hoher Amplituden, so dass die allgemeine Versagensgerade eventuell produktspezifisch günstiger positioniert werden kann. Problematisch ist jedoch die Wahl eines Versuchspunktes, der möglichst genau im Übergangsbereich von stabilem zu instabilen Verhalten liegen sollte.

c. Spezielle Versagensgerade für eine bestimmte Kombination aus Erdstoff und Bewehrungsmaterial

Es sind mindestens 6 zyklische Modellversuche mit unterschiedlichen Lastkombinationen durchzuführen, um die Lage der Versagensgerade produktspezifisch möglichst exakt festlegen zu können.

Detailliertere Informationen zum Data Mining werden in Abschnitt 7.3.4 gegeben.

7.3.3 Ermittlung der statischen Bezugsparameter

Variationen der statischen Parameter Auflast σ und Einbindelänge l werden durch die Normalisierung des Oberlastniveaus und der Amplitude berücksichtigt. Bei konstanten Absolut- einwirkungen verändert sich damit das Bezugssystem und verschiebt die Datenpunkte.

Zur Ermittlung des Einflusses der Auflast und der Einbindelänge stehen im Wesentlichen drei Methoden zur Verfügung:

a. Abschätzverfahren

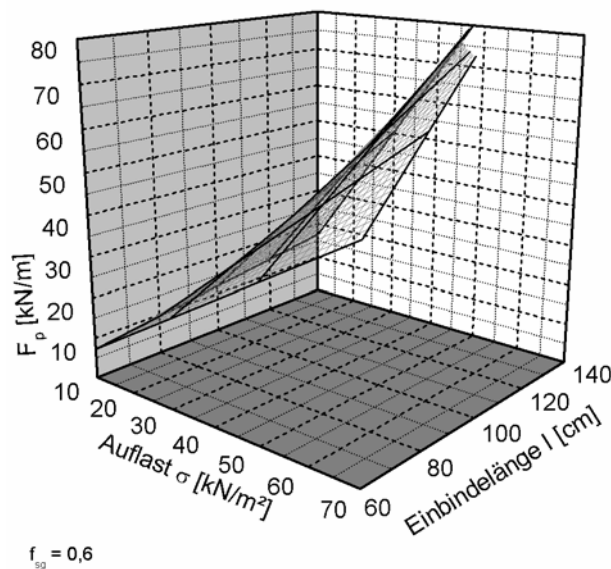
Durch die Wahl eines konstanten Verbundbeiwertes f_{sg} kann die maximale statische Auszugskraft F_p für beliebige Eingangsparameter abgeschätzt werden. Da bei Vorliegen eines Strukturwiderstandes der Verbundbeiwert tiefenabhängig ermittelt werden müsste (Abschnitt 2.4.1), handelt es sich um eine Näherungslösung, die nach EB GEO (1997) jedoch ausdrücklich zugelassen wird.

b. Abschätzverfahren mit Kalibrierung an *einem* Punkt

Es handelt sich um das Verfahren nach Punkt a. mit einer zusätzlichen Überprüfung und ggf. Anpassung des Verbundbeiwertes an einer ausgewählten Einwirkungskombination aus Auflast und Einbindelänge.

c. Versuchsbasiertes Verfahren mit Durchführung einer statischen Versuchsmatrix

Es wird ein Versuchsprogramm aus mindestens fünf statischen Versuchen mit unterschiedlichen Auflasten und Einbindelängen durchgeführt und eine Beziehung zwischen diesen Einflussparametern und der maximalen Auszugskraft hergestellt. Es handelt sich um das exakteste Berechnungsverfahren. Bei einer Extrapolation über die untersuchten Eingangsdaten hinaus ist auf eine Allgemeingültigkeit der Ergebnisse zu achten.

**Bild 7.8:**

Entwicklung der maximalen Auszugskraft in Abhängigkeit der Auflast und der Einbindelänge beim Abschätzverfahren

In Bild 7.8 wird die Entwicklung der maximalen Auszugskraft F_p in Abhängigkeit der Auflast und der Einbindelänge bei Verwendung des Abschätzverfahrens mit Gleichung (7.2) für einen Interaktionskoeffizienten von 0,6 dargestellt. Dieses Modell geht von einem linearen Zusammenhang zwischen beiden Eingangsparametern und F_p aus. Aufgrund der Erkenntnisse in Abschnitt 2.4.3.2.6 ist diese Annahme für bestimmte Kombinationen anzuzweifeln.

$$F_{p,k\%} = 2 \cdot \sigma \cdot l_{k\%} \cdot f_{sg} \cdot \frac{1}{\gamma_B} \quad (7.2)$$

mit: $F_{p,k\%}$ = Maximale statische Auszugskraft bei einer Auflast σ und einer Einbindelänge, die k % der Referenzeinbindelänge beträgt

σ = Auflast

$l_{k\%}$ = Einbindelänge (k % der Referenzeinbindelänge) in [m]

f_{sg} = Interaktionskoeffizient

γ_B = Sicherheitsbeiwert

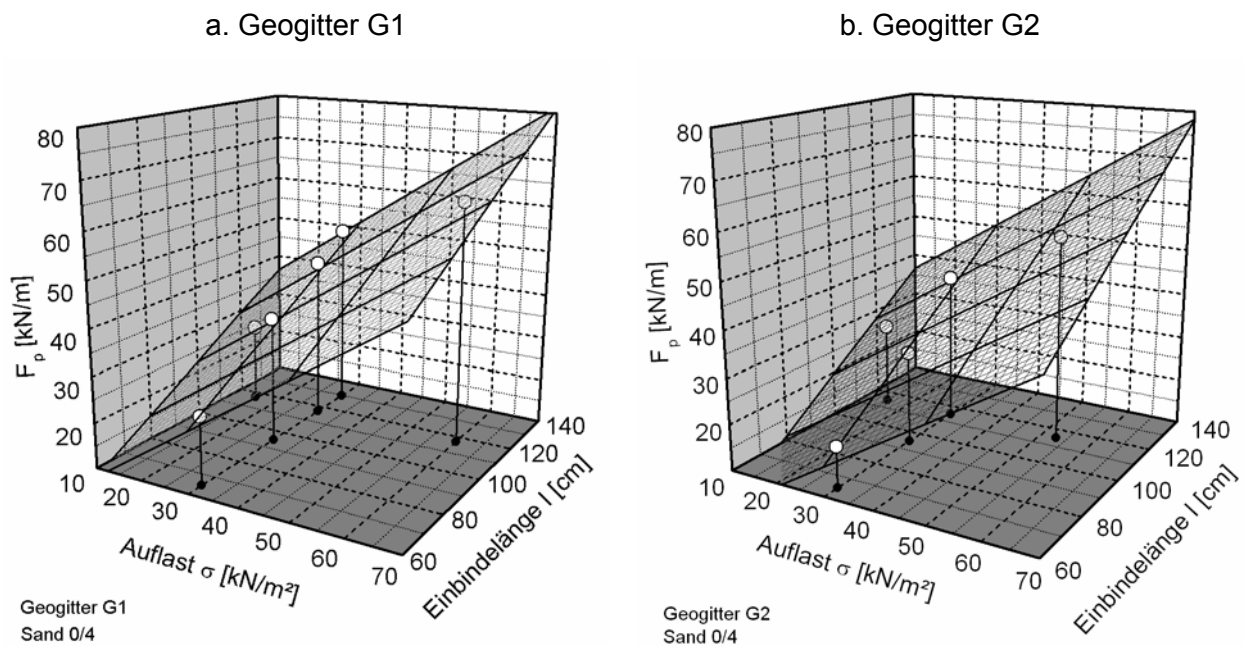


Bild 7.9: Entwicklung der maximalen Auszugskraft in Abhängigkeit der Auflast und der Einbindelänge beim versuchsbasierten Verfahren im Sand 0/4 mit Darstellung der Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse des versuchsbasierten Verfahrens werden für Geogitter G1 und G2 im Sand 0/4 in Bild 7.9 visualisiert. Für diese Kombinationen ist jeweils eine Versuchsmatrix aus fünf bzw. sechs Versuchen unterschiedlicher Einbindelänge und Auflast durchgeführt worden. Bild 7.9 zeigt eine gute Übereinstimmung der linearen Regressionsgleichung mit den Versuchsergebnissen. Da sich die gute Abbildungsqualität der Regression nur auf den untersuchten Bereich beschränkt, ist eine Extrapolation nur innerhalb bestimmter Grenzen zu empfehlen.

$$F_{p,k\%} = (f + g \cdot \sigma + h \cdot l_{k\%}) \cdot \frac{1}{\gamma_B} \quad (7.3)$$

mit: $F_{p,k\%}$ = Maximale statische Auszugskraft bei einer Auflast σ und einer Einbindelänge, die $k\%$ der Referenzeinbindelänge beträgt

f, g, h = Regressionskoeffizienten für die entsprechende Geokunststoff/Bodenkombination

γ_B = Sicherheitsbeiwert

$l_{k\%}$ = Einbindelänge ($k\%$ der Referenzeinbindelänge) in [cm]

Detailliertere Informationen zum Data Mining werden in Abschnitt 7.3.4 gegeben.

7.3.4 Hinweise zum Data Mining

Für die Planung eines Untersuchungsprogramms ist die genaue Kenntnis der erforderlichen Zielparameter von Bedeutung. Es ist zu klären, ob Verformungen ermittelt werden sollen oder eine Bemessung durchgeführt werden soll. Weiterhin sind Fragen der Datenqualität und der Allgemeingültigkeit der Versuchsdaten zu klären. Als Hilfsmittel für eine umfassende Versuchsplanung können Bild 7.10 und Tabelle 7.1 herangezogen werden.

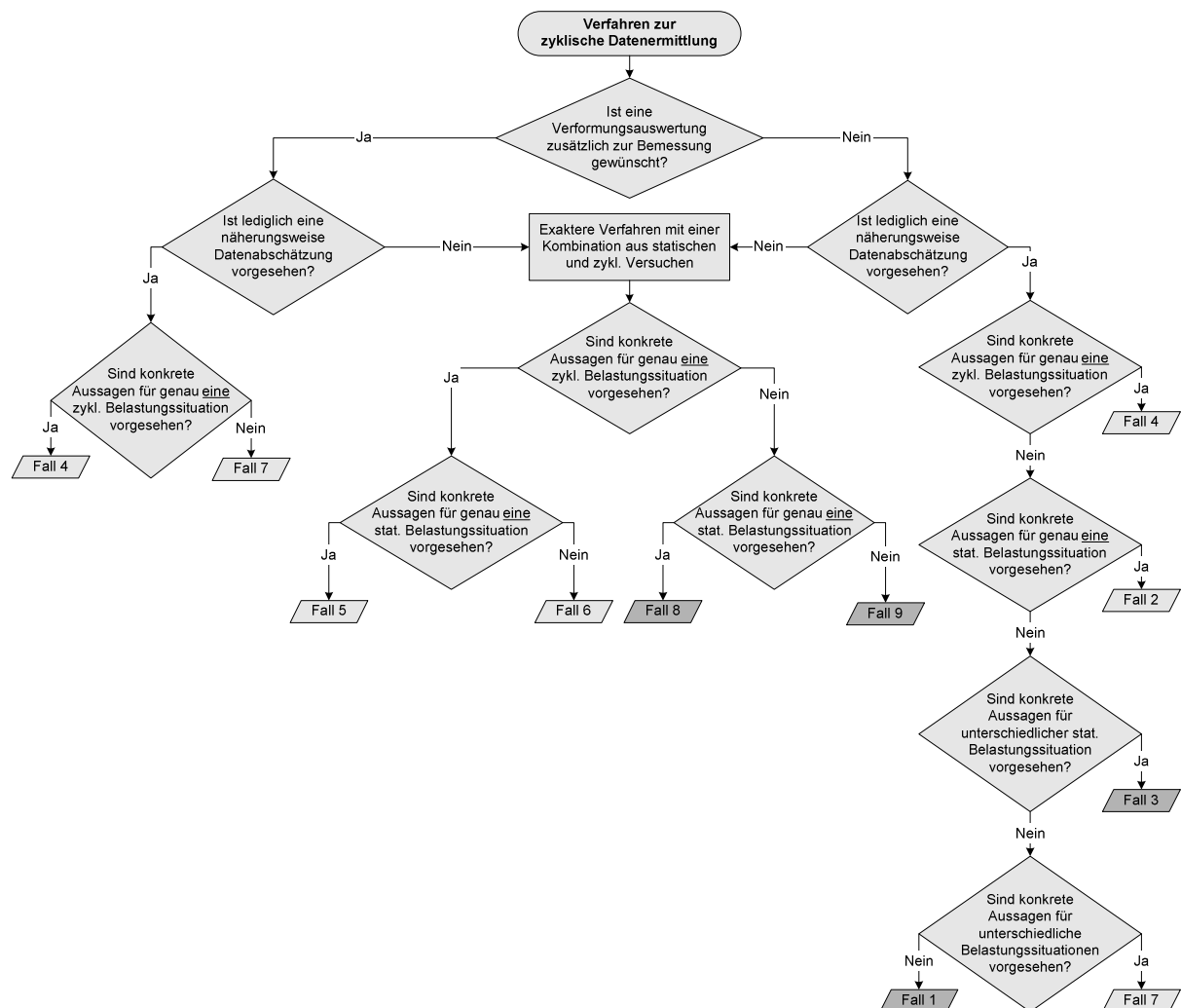


Bild 7.10: Verfahren zur Versuchsplanung in Abhängigkeit der gewählten Zielparameter

Ist aufgrund der geforderten Randbedingungen aus Bild 7.10 ein Versuchsfall ausgewählt worden, so kann der Tabelle 7.1 das erforderliche Programm statischer und zyklischer Modellversuche entnommen werden. Detailliertere Informationen zu den einzelnen Fällen sind dem Anhang G.1 zu entnehmen. Im Folgenden werden typische Standardfälle kurz vorgestellt.

- Fall 1: Es sind keine Versuche durchzuführen. Dieser Fall kann für eine Überslagsbemessung im Rahmen einer Vorbemessung herangezogen werden. Ein für die gewählte Materialkombination passender Interaktionskoeffizient muss bekannt sein oder sinnvoll gewählt werden.
- Fall 3: Durch exakte Bestimmung der maximalen Auszugskraft ist eine genauere Bestimmung des Versagensverhaltens in Abhängigkeit der Einbindelänge und der Auflast möglich.
- Fall 8: Aus den Versuchsergebnissen können materialspezifische Verformungsgleichungen ermittelt werden. Konkrete Versagensaussagen sind für eine Tiefenlage und eine Einbindelänge mit einer für diese Materialkombination optimierten Versagensbeziehung möglich, können aber mit Hilfe des Abschätzverfahrens in guter Näherung allgemeingültig ermittelt werden.
- Fall 9: Aus den Versuchsergebnissen können materialspezifische Verformungsgleichungen ermittelt werden. Konkrete Versagensaussagen sind für eine Tiefenlage und eine Einbindelänge mit einer für diese Materialkombination optimierten Versagensbeziehung möglich, können aber mit Hilfe des versuchsbasierten Verfahrens in sehr guter Näherung allgemeingültig ermittelt werden.

Tabelle 7.1: Darstellung denkbarer Kombinationen von statischen und zyklischen Modellversuchen

<div>Statische Versuche</div> <div>Zyklische Versuche</div>	$\sigma \backslash l$	l_1	l_2	l_3
	σ_1			
	σ_2			
	σ_3			

$\sigma \backslash l$	l_1	l_2	l_3
σ_1			
σ_2		X	
σ_3			

$\sigma \backslash l$	l_1	l_2	l_3
σ_1	(X)	X	(X)
σ_2	X	X	X
σ_3	(X)	X	(X)

	Fall 1 0 stat. Versuche 0 zykl. Versuche	**Fall 2** 1 stat. Versuch 0 zykl. Versuche	**Fall 3** ≥ 5 stat. Versuche 0 zykl. Versuche
	Fall 4 0 stat. Versuche 1 zykl. Versuche	**Fall 5** 1 stat. Versuch 1 zykl. Versuche	**Fall 6** ≥ 5 stat. Versuche 1 zykl. Versuche
	Fall 7 0 stat. Versuche ≥ 6 zykl. Versuche	**Fall 8** 1 stat. Versuch ≥ 6 zykl. Versuche	**Fall 9** ≥ 5 stat. Versuche ≥ 6 zykl. Versuche

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind für die Geogitter G1 und G2 im Sand 0/4 Untersuchungen entsprechend des Falles 9 und für die weiteren Geogitterversuche entsprechend des Falles 8 durchgeführt worden.

7.3.5 Konstruktion eines Bemessungsnomogramms

Ziel dieses Verfahrens ist es, ein Nomogramm mit einer Ablesemöglichkeit der optimalen Einbindelänge für eine bestimmte zyklische Belastungssituation bei einer festgelegten Auflast zu entwickeln. Ein detailliertes Ablaufschema dieser Konstruktion ist dem Bild 7.11 zu entnehmen.

Vor Anwendung dieses Verfahrens sind als besonders relevante Eingangsparameter die Versagensgerade bei der Referenzeinbindelänge von 100%, eine Berechnungsbeziehung zur Bestimmung der maximalen statischen Auszugskraft F_p (Abschnitt 7.3.3) sowie die gewünschte Abstufung der Einbindelängen im Nomogramm festzulegen.

In die Gleichung der Versagensgeraden werden die Gleichungen zur Bestimmung der maximalen statischen Auszugskraft eingesetzt, so dass sich durch Auflösung nach dem Oberlastniveau verfahrensabhängig die Gleichungen (7.4) und (7.5) ergeben.

$$F_{o,k\%} = 2 \cdot \eta_1 \cdot \sigma \cdot l_{k\%} \cdot f_{sg} - \eta_2 \cdot A_{k\%} \quad (7.4)$$

$$F_{o,k\%} = \eta_1 \cdot (f + g \cdot \sigma + h \cdot l_{k\%}) - \eta_2 \cdot A_{k\%} = \eta_1 \cdot F_{p,k\%} - \eta_2 \cdot A_{k\%} \quad (7.5)$$

mit: $A_{k\%}/F_{o,k\%} =$ Wertepaare, die bei einer Einbindelänge von $l_{k\%}$ auf der Versagensgeraden liegen

Bei festgelegten Parametern „Auflast“ und „Einbindelänge“ ist die Ermittlung von Belastungswertepaaren möglich, aus denen bspw. Versagensgeraden bei unterschiedlichen Einbindelängen ermittelt werden können. Durch Bezug dieser Wertepaare auf die maximale statische Auszugskraft bei der Referenzeinbindelänge von 100 % nach Gleichung (7.6) ergibt sich ein Nomogramm entsprechend Bild 7.12.

$$f_{o,k\%} = \frac{F_{o,k\%}}{F_{p,100\%}}; a_{k\%} = \frac{A_{k\%}}{F_{p,100\%}} \quad (7.6)$$

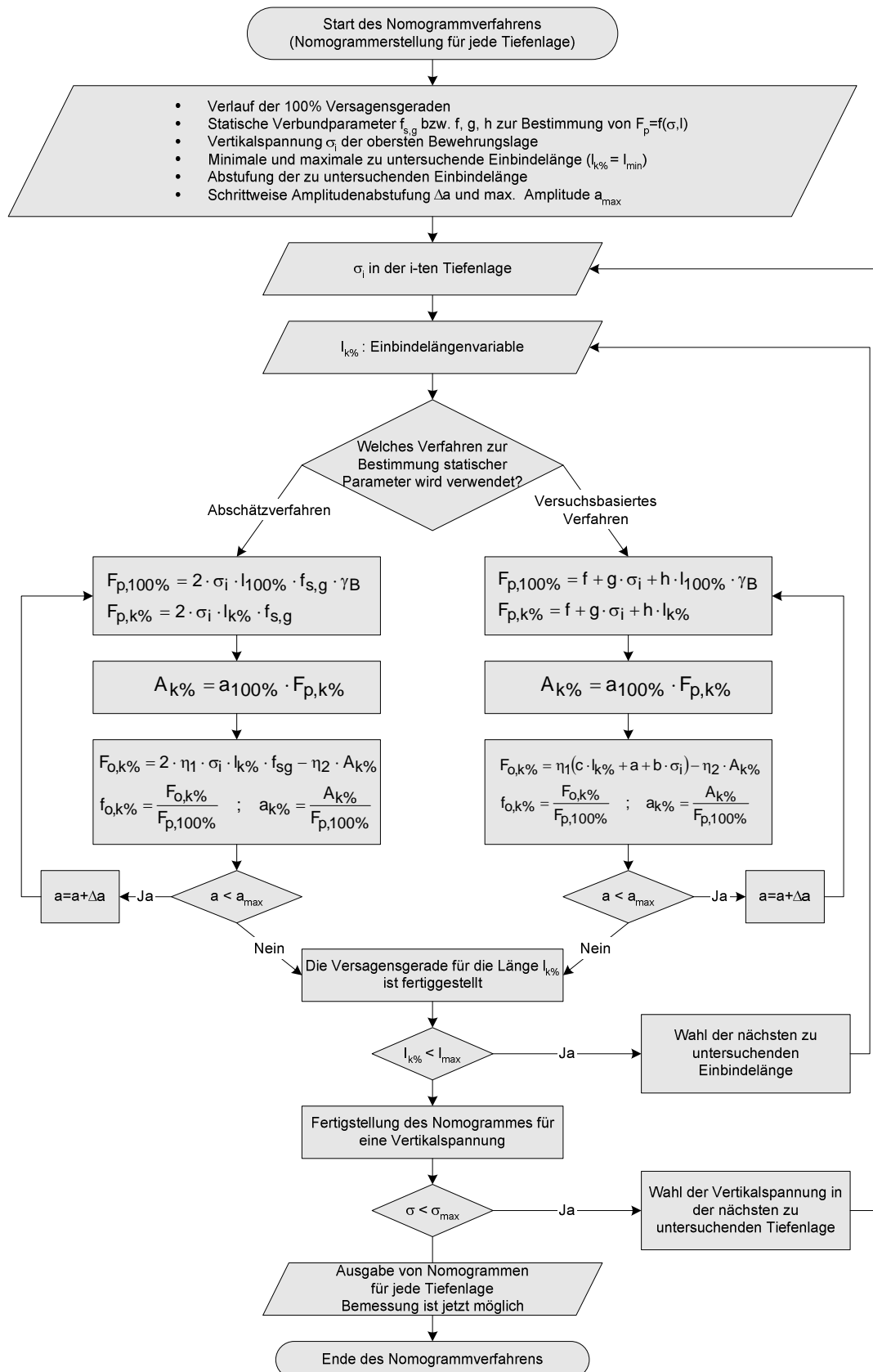


Bild 7.11: Ablauf der Bemessung bei Verwendung des Nomogrammverfahrens

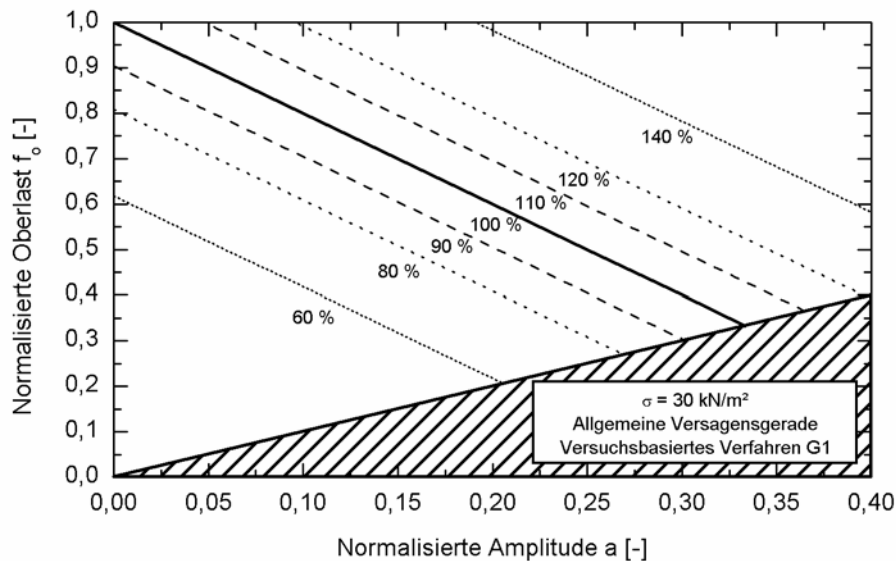


Bild 7.12: Bemessungsnomogramm für das Geogitter G1 im Sand bei einer Auflast von $\sigma = 30 \text{ kN/m}^2$ auf der Grundlage der Datenbasis des Falles 9

Die Erstellung der Nomogramme erfolgt jeweils mit Bezug auf eine fixierte Referenzeinbindelänge, die mit 100 % definiert wird. Erfolgt die Nomogrammkonstruktion auf der Basis zyklischer Modellversuche, so ist die in den Versuchen verwendete Einbindelänge als Referenzeinbindelänge zu empfehlen. Es ist jedoch auch eine Berechnung auf Basis beliebiger anderer Referenzeinbindelängen möglich. Die Auswirkungen einer Veränderung dieses Bezugswertes für einen Beispielpunkt mit konstanten Absolutbelastungen werden in Bild 7.15 dargestellt.

Nomogramme für weitere vertikale Auflastspannungen sind dem Anhang G.2 zu entnehmen.

7.3.6 Entwicklung eines analytischen Bemessungsverfahrens

Ziel dieses Verfahrens ist es, eine direkte analytische Berechnung der optimalen Einbindelänge für eine bestimmte zyklische Beanspruchungssituation durchzuführen.

Vor Anwendung des Verfahrens sind als besonders relevante Eingangsparameter die Versagensgerade bei der Referenzeinbindelänge von 100 %, eine Berechnungsbeziehung zur Bestimmung der maximalen statischen Auszugskraft F_p (Abschnitt 7.3.3) sowie – im Gegensatz zum Nomogrammverfahren – eine konkrete zyklische Einwirkungskombination vorzugeben.

Zur Entwicklung des analytischen Bemessungsverfahrens werden die Gleichungen zur Ermittlung der maximalen statischen Auszugskraft verfahrensabhängig in die Gleichung der Versagensgerade eingesetzt (Gleichungen (7.7) und (7.9)).

Abschätzverfahren zur Ermittlung von F_p :

$$\frac{F_o}{(2 \cdot \sigma \cdot l_{opt} \cdot f_{sg}) \cdot \frac{1}{\gamma_B}} = \eta_1 - \eta_2 \cdot \frac{A}{(2 \cdot \sigma \cdot l_{opt} \cdot f_{sg}) \cdot \frac{1}{\gamma_B}} \quad (7.7)$$

$$l_{opt} = \frac{F_o + \eta_2 \cdot A}{2 \cdot \sigma \cdot \eta_1 \cdot f_{sg} \cdot \frac{1}{\gamma_B}} \quad (7.8)$$

Durch Einsetzen der bekannten statischen Einflussparameter sowie der zyklischen Einwirkung und Umstellung der entsprechenden Gleichungen kann die optimale Einbindelänge bestimmt werden.

Versuchsbasiertes Verfahren zur Ermittlung von F_p :

$$\frac{F_o}{(f + g \cdot \sigma + h \cdot l_{opt}) \cdot \frac{1}{\gamma_B}} = \eta_1 - \eta_2 \cdot \frac{A}{(f + g \cdot \sigma + h \cdot l_{opt}) \cdot \frac{1}{\gamma_B}} \quad (7.9)$$

$$l_{opt} = \frac{\gamma_B \cdot F_o - \eta_1 \cdot (f + g \cdot \sigma) + \eta_2 \cdot A \cdot \gamma_B}{\eta_1 \cdot h} \quad (7.10)$$

Ein detailliertes Ablaufschema zur Entwicklung des analytischen Bemessungsverfahrens ist dem Bild 7.13 zu entnehmen.

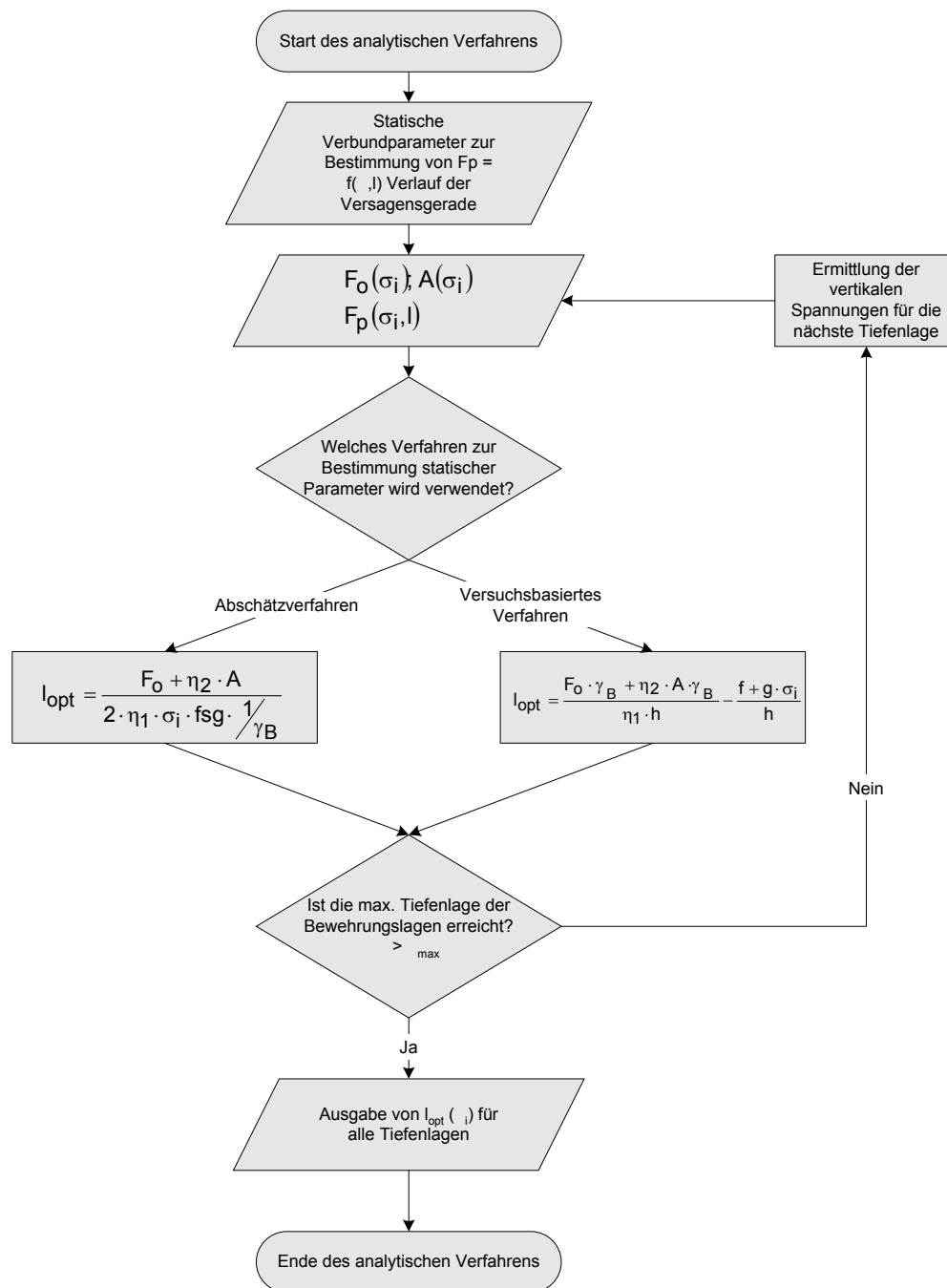


Bild 7.13: Ablauf der Bemessung bei Verwendung des analytischen Verfahrens

7.3.7 Verifizierung der Allgemeingültigkeit des Verfahrens

7.3.7.1 Verifizierung variabler Einbindelängen

Aufgrund der vorgestellten Verfahrensmethodik sind die Nomogramme auch für von der Referenzeinbindelänge abweichende Einbindelängen anwendbar. Im Rahmen einer versuchs-technischen Überprüfung wurden am Geogitter G2 zwei zyklische Modellversuche mit einer auf 95 cm reduzierten Einbindelänge durchgeführt (Bild 7.14). Eine exakte Aussage zum

Versagensverhalten ist nur möglich, wenn die Versuche mit reduzierter Einbindelänge genau den Versagenszustand erreichen würden. Da diese Randbedingung versuchstechnisch nur schwer zu erfüllen ist, kann nur eine Tendenz aufgezeigt werden. Beide Versuche liegen im sicheren Bereich, wobei eine Abschätzung der Sicherheit über den Abstand zur Versagensgeraden vorgenommen werden kann. Als Versagensgerade dient in diesem Fall die Gerade mit 83 % der Referenzeinbindelänge (= 95 cm). Dabei liegt der Versuch Z G2 S 33 mit 60 % der maximalen Peakverformung dichter an der Versagensgeraden als der Versuch Z G2 S 34 mit 40 % der maximalen Peakverformung.

Es zeigt sich, dass auch zyklische Modellversuche mit abweichenden Einbindelängen in die Nomogramme mit einer festgelegten Referenzeinbindelänge integriert werden können.

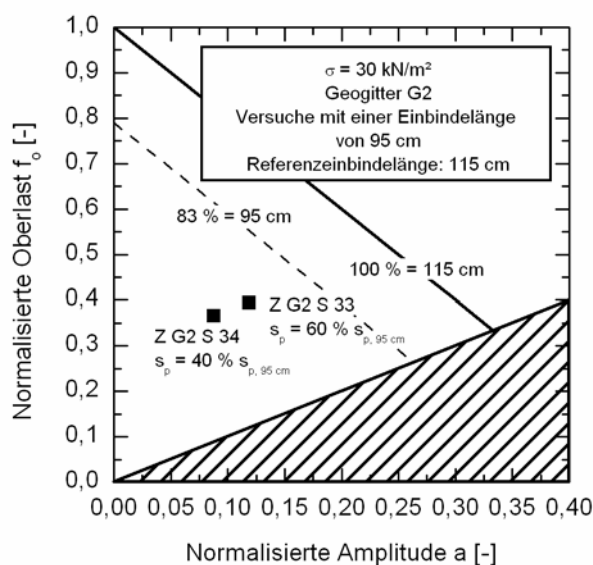


Bild 7.14:

Anwendung eines Nomogramms mit einer Referenzeinbindelänge von 115 cm auf zyklische Modellversuche einer Einbindelänge von 95 cm

7.3.7.2 Verifizierung variabler Vertikalspannungen

Aufgrund der vorgestellten Verfahrensmethodik können die Nomogramme für unterschiedliche Vertikalspannungen konstruiert werden. Zur versuchstechnischen Überprüfung sind zwei zyklische Modellversuche mit einer erhöhten Auflast durchgeführt worden (Z G2 S 31 und Z G2 S 32). Beide Versuche sind mit Gesamtverschiebungen von 10 mm nach 10.000 Lastspielen noch deutlich von einem Versagenszustand entfernt, so dass hier nur Tendenzen aufgezeigt werden können. Bei Einordnung dieser Versuche in ein Nomogramm, das unter Zugrundelegung der Datenbasis der Versuche unter Standardauflastbedingungen für einen erhöhten Vertikalspannungsfall erstellt worden ist, ergibt sich eine gute Datenübereinstimmung.

Es zeigt sich, dass die Nomogrammvariation für unterschiedliche Tiefenlagen über eine Variation der maximalen statischen Auszugskraft F_p im Rahmen bestimmter Grenzen anwendbar ist.

7.4 Anwendung der Verfahren zur zyklischen Bemessung des Verbundverhaltens

7.4.1 Einführung

Im Folgenden wird nur das zyklische Modul der Gesamtbemessung einer bewehrten Konstruktion unter zyklischer Belastung vorgestellt (Abschnitt 7.1). Es wird bei der Darstellung der Anwendung davon ausgegangen, dass die Bemessungswerkzeuge bereits im Rahmen des Abschnittes 7.3 erstellt worden sind.

7.4.2 Anwendung des Nomogrammverfahrens

Voraussetzung für die Anwendung des Nomogrammverfahrens ist ein für die Beanspruchung zutreffendes Bemessungsnomogramm nach Abschnitt 7.3.5. Die Anwendung gliedert sich in drei Abschnitte:

- I. Bestimmung der erforderlichen Eingangsparameter
- II. Anwendung des Nomogramms
- III. Ermittlung der erforderlichen Einbindelänge

Tabelle 7.2: Vorgehen bei der Anwendung des Nomogrammverfahrens

	Allgemeine Beschreibung des Vorgehens	Fallbeispiel (Bild 7.15a.)
Eingangsparameter	<p>Allgemeine Eingangsparameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> Wahl eines passenden Nomogramms Definition einer Referenzeinbindelänge $l_{100\%}$ Festlegung der Vertikalspannung σ Maximale stat. Auszugskraft $F_{p,100\%}$ Sicherheitsniveau <p>Zyklische Beanspruchungsparameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> Oberlastniveau F_o Maximale Amplitude A 	<p>G2, Sand 0/4, 10.000 Lastspiele</p> <p>$l_{100\%} = 1,15 \text{ m}$</p> <p>$\sigma = 30 \text{ kN/m}^2$</p> <p>$F_{p,100\%} = 39,8 \text{ kN/m}$</p> <p>$\gamma_B = 1,00$</p> <p>$F_o = 17,9 \text{ kN/m}$</p> <p>$A = 6,0 \text{ kN/m}$</p>
Anwendung	<ul style="list-style-type: none"> Berechnung $f_o = F_o / F_{p,100\%}$ Berechnung $a = A / F_{p,100\%}$ Eintragen der Werte ins Nomogramm Ablesung der notwendigen Einbindelänge in Prozent der Referenzeinbindelänge 	<p>$f_o = 0,45$</p> <p>$a = 0,15$</p>

	Allgemeine Beschreibung des Vorgehens	Fallbeispiel (Bild 7.15a.)
Einbindelänge	<ul style="list-style-type: none"> Berechnung der notwendigen Einbindelänge für den zyklischen Bemessungsfall $l = k\% \times l_{100\%}$	$l = 0,8 \times 1,15 = 0,92 \text{ m}$

Die allgemeine Vorgehensweise mit den notwendigen Eingangsparametern wird in Kurzform in Tabelle 7.2 beschrieben und in Bild 7.15a. visualisiert.

Anhand von Bild 7.15b. wird verdeutlicht, dass die Wahl beliebiger Bezugsängen im Nomogramm (in diesem Falle wird exemplarisch 0,92 m gewählt) zu identischen notwendigen Einbindelängen führt.

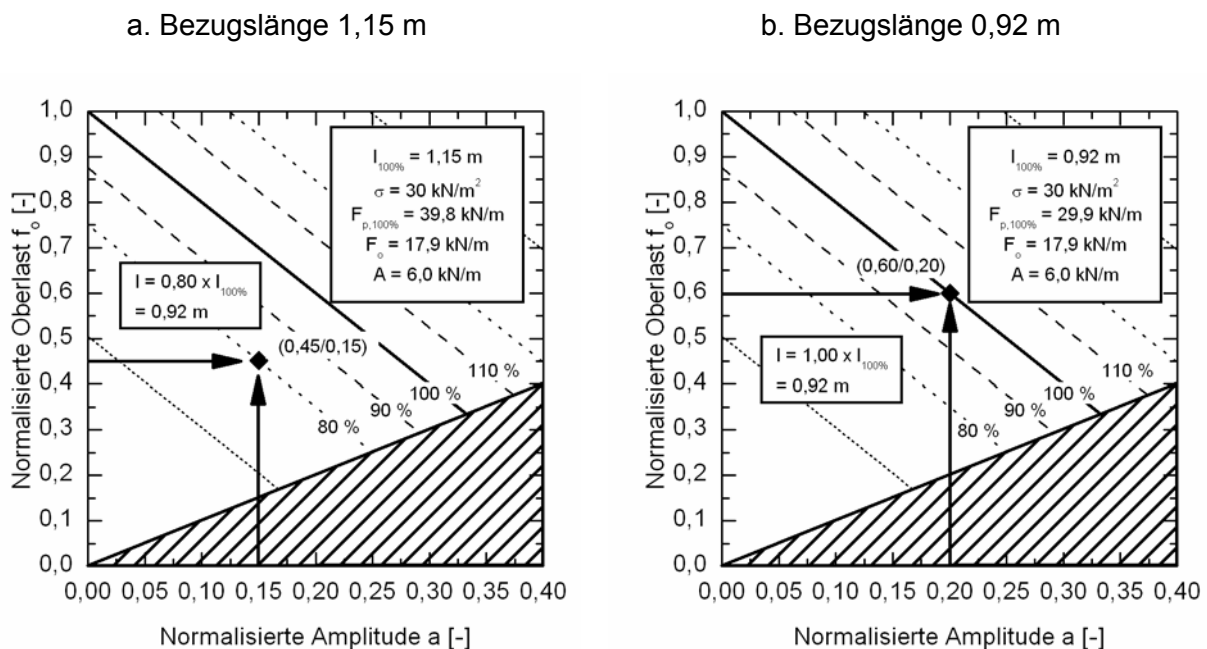


Bild 7.15: Anwendungsbeispiel für das Nomogrammverfahren

7.4.3 Anwendung des analytischen Bemessungsverfahrens

Das analytische Bemessungsverfahren kann bei Vorliegen der Gleichungen zur Ermittlung der optimalen Einbindelänge nach Abschnitt 7.3.6 und Kenntnis der Versagensbeziehung angewendet werden.

Die Anwendung gliedert sich in zwei Abschnitte:

- I. Bestimmung der Eingangsparameter
- II. Ermittlung der optimalen Einbindelänge

Tabelle 7.3: Vorgehen bei der Anwendung des analytischen Bemessungsverfahrens

	Allgemeine Beschreibung des Vorgehens
Eingangsparameter	<p>Allgemeine Eingangsparameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Festlegung der Versagensgerade in Abhängigkeit der Materialkombination und der Lastspielzahl • Festlegung der Vertikalspannung σ • Statische Interaktionsparameter f_{sg} bzw. f, g, h • Sicherheitsniveau <p>Zyklische Beanspruchungsparameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Oberlastniveau F_o • Maximale Amplitude A
Einbinde-länge	<ul style="list-style-type: none"> • Berechnung der notwendigen Einbindelänge für den zyklischen Bemessungsfall l_{opt}

7.4.4 Allgemeine Bemessungsvorschläge

Im Rahmen einer endgültigen Systembemessung sollten unterschiedliche Einbindelängen in den einzelnen Tiefenlagen angepasst werden, um den Bauablauf zu vereinfachen und die versehentliche Verlegung von Bewehrungslagen mit unzutreffenden Einbindelängen zu verhindern.

Es ist darauf zu achten, bei der obersten Bewehrungslage eine bestimmte Mindestüberdeckung zur Verhinderung von Beschädigungen durch die zyklische Beanspruchung und zur Gewährleistung einer minimalen statischen Verankerungswirkung vorzusehen.

Nach Empfehlung 6.11 (November 2004) sind an zyklisch beanspruchte Konstruktionen besondere Anforderungen bezüglich des Füllbodens zu stellen. Es wird empfohlen, ein qualifiziertes Material mit einem Winkel der inneren Reibung von $\varphi_k \geq 30^\circ$ und einem Verdichtungsgrad von $D_{pr} \geq 100\%$ einzubauen. Auch an die Kornzusammensetzung, Kornform und –festigkeit werden bestimmte Anforderungen gestellt, um Kornumlagerungen, Beeinflussungen des Reibungsverbundes und Verformungen zu minimieren.

7.5 Bemessungsbeispiel

Zur Verdeutlichung des Bemessungsverfahrens wird im Folgenden exemplarisch eine Steilböschung mit einer Eisenbahnverkehrsbelastung als Fallbeispiel vorgestellt. Die Bemessung ist in zwei Arbeitsschritten durchzuführen: Zunächst ist eine statische Bemessung mit herkömmlichen Ansätzen und im Anschluss eine zyklische Bemessung auszuführen. Das Bei-

spiel ist in Anlehnung an die Empfehlung 6.11 (November 2004) gewählt worden. Es wird ausschließlich das Versagen auf Gleitflächen, bei denen Geogitterlagen geschnitten werden, untersucht. Die weiteren Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit sowie der Gebrauchstauglichkeit werden nicht geführt.

7.5.1 Eingangsparameter

Die bewehrte Stützkonstruktion ist mit einer Frontwand aus Betonsteinen versehen, die kraftschlüssig mit den verankernden Bewehrungslagen verbunden sind.

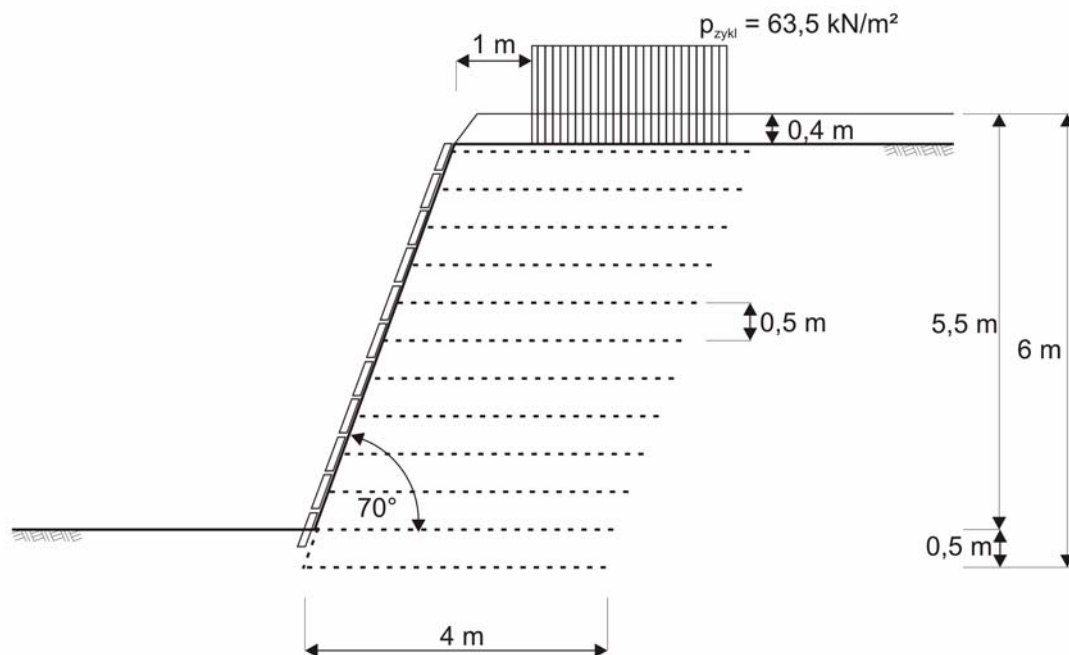


Bild 7.16: Eingangsparameter der gewählten Beispielböschung

Geometrieparameter:

Böschungshöhe:	5,50 m
Böschungsneigung α :	70°
Einbindung des bewehrten Körpers in den Untergrund:	0,50 m
Abstand der Bewehrungslagen l_v :	0,50 m
Tiefenlage der obersten Bewehrungslage unter UK Schwelle:	0,50 m
Mächtigkeit des Oberbaus:	0,40 m

Bodenparameter:

Verwendeter Füllboden:	Sand SW
Reibungswinkel φ :	35°
Kohäsion c :	0 kN/m²
Einbauwichte γ :	18 kN/m³

Erdruchdruckbeiwert k_0 : 0,40

Geokunststoffparameter:

Verwendetes Geogitter: Geogitter G1

Sicherheitsbeiwerte:

Ständige Lasten γ_G 1,00

Veränderliche Lasten γ_Q 1,30

Scherfestigkeit γ_ϕ, γ_c 1,25

7.5.2 Ansatz der statischen Verbundverhältnisse

Für die vorgegebene Kombination aus Erdstoff und Geokunststoff liegen Versuchsdaten nach Fall 9 der Planungsmatrix vor (Abschnitt 7.3.4). Es wird daher mit dem versuchsbasierten Verfahren zur Bestimmung des Verbundverhaltens in Abhängigkeit von Auflast und Einbindelänge gearbeitet. Es ergibt sich damit aus Gleichung (7.3) folgende Beziehung:

$$F_{p,100\%} = (-20,443 + 0,744 \cdot \sigma + 0,354 \cdot l_{100\%}) \quad (7.11)$$

Als Referenzeinbindelänge $l_{100\%}$ wird aufgrund der vorliegenden Versuchsdaten 115 cm gewählt.

Zur Veranschaulichung werden die Berechnungen der Widerstandsseite mit charakteristischen Werten ($\gamma_B = 1,00$) und alternativ mit einem Sicherheitsbeiwert $\gamma_B = 1,40$ durchgeführt.

7.5.3 Belastungsparameter

Es wird das Regellastbild Typ 3 nach DIN Fachbericht 101 eines ICE mit einer Geschwindigkeit von 230 km/h gewählt. Bei der Verwendung eines Schotter-Oberbausystems ergibt sich dabei eine zyklische Lastkomponente $\sigma_{k,zykl,max,z=0} = 63,5 \text{ kN/m}^2$. Nähere Informationen sind der Empfehlung 6.11 (November 2004) und Herold und Tamáskovics (2004) zu entnehmen.

Die Tiefenabhängigkeit der zyklischen Spannungskomponente wird unter Verwendung eines Nomogrammverfahrens nach Herold und Tamáskovics (2004) für einen Steifemodul des bewehrten Erdstützkörpers von $E_s = 50 - 80 \text{ MN/m}^2$ und für eine Fundamentform F2 ($L/B = 0,4$) ermittelt. Dabei ist folgende Beziehung zu verwenden:

$$\sigma_{k,zykl} = F_{skal} \cdot \sigma_{k,zykl,max,z=0} \quad (7.12)$$

mit: $\sigma_{k,zykl}$ Vertikale zyklische Einwirkung in unterschiedlichen Tiefenlagen z
 F_{skal} Amplitudenfaktor (ist dem Anhang G.3 zu entnehmen)
 $\sigma_{k,zykl,max,z=0}$ Zyklische Einwirkung in der Lasteinleitungsebene

Da die Daten aus den zyklischen Modellversuchen lediglich für maximal 10.000 Lastspiele vorliegen, erfolgt die Bemessung mit der Versagensgerade für 10.000 Lastspiele.

Eine Umrechnung der vertikalen in horizontale Spannungen erfolgt nach Empfehlung 6.11 (November 2004):

$$\sigma_{k,zykl,h} = k_0 \cdot \sigma_{k,zykl} \quad (7.13)$$

mit: $\sigma_{k,zykl,h}$ Horizontale zyklische Einwirkung in unterschiedlichen Tiefenlagen z
 k_0 Erdruchdruckbeiwert

Aus den horizontalen zyklischen Spannungen wird die Kraft in den Bewehrungslagen unter Berücksichtigung des Sicherheitsniveaus auf der Einwirkungsseite über den Lagenabstand abgeschätzt.

$$F_{B,d,zykl} = l_v \cdot \sigma_{k,dyn,h} \cdot \gamma_Q \quad (7.14)$$

mit: $F_{B,zykl}$ Horizontale zyklische Einwirkung in den Bewehrungslagen der Tiefe z
 l_v Abstand der Bewehrungslagen

Tabelle 7.4: Lagenweise Zusammenstellung der Beanspruchungsparameter für die obersten fünf Bewehrungslagen des Fallbeispiels

Lage	Tiefe z	$\gamma^* \gamma_g^*$ z	Auflast (Oberbau)	$\sum \sigma_{stat,i}$	F_{stat}	F_{skal}	$\sigma_{k,zykl,i}$	$F_{B,d,zykl,i}$	$F_{p,100\%}$	F_o	A
[-]	[m]	[kN/m ³]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m]	[-]	[kN/m ²]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]
1	0,10	1,8	7,2	9	1,8	0,92	58,42	11,68	26,96	16,98	15,80
2	0,60	10,8	7,2	18	3,6	0,64	40,64	8,13	33,66	14,17	10,57
3	1,10	19,8	7,2	27	5,4	0,51	32,39	6,48	40,36	13,82	8,42
4	1,60	28,8	7,2	36	7,2	0,40	25,40	5,08	47,05	13,80	6,60
5	2,10	37,8	7,2	45	9,0	0,35	22,23	4,45	53,75	14,79	5,79

Mit der Ermittlung der maximalen statischen Auszugskraft $F_{p,100\%}$ und der Zusammenstellung der zyklischen Beanspruchungsparameter F_o und A stehen alle notwendigen Informationen für die Bemessung zur Verfügung.

7.5.4 Bemessung

Zu Vergleichszwecken wird die Bemessung mit dem Nomogrammverfahren und dem analytischen Verfahren durchgeführt. Die Ergebnisse der Tabelle 7.5 beruhen auf einer Berechnung mit Gleichung (7.10).

Exemplarisch erfolgt in Gleichung (7.15) die Ermittlung der optimalen Einbindelänge mit dem analytischen Verfahren für die 2. Bewehrungslage mit einem Sicherheitsniveau von $\gamma_B = 1,00$.

$$l_{\text{opt}} = \frac{1,0 \cdot 14,17 - 1,0 \cdot (-20,443 + 0,744 \cdot 18) + 2,0 \cdot 10,57 \cdot 1,0}{1,0 \cdot 0,354} = 120 \text{ cm} \quad (7.15)$$

Tabelle 7.5: Lagenweise Zusammenstellung der Bemessungsergebnisse für die obersten fünf Bewehrungslagen des Fallbeispiels

Lage	Tiefe z	$F_{p,100\%}$	F_o	A	f_o	a	l_{opt} $\gamma_B = 1,00$	l_{opt} $\gamma_B = 1,40$
[-]	[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[-]	[-]	[m]	[m]
1	0,10	26,96	16,98	15,80	0,63	0,59	1,76	2,31
2	0,60	33,66	14,17	10,57	0,42	0,31	1,20	1,60
3	1,10	40,36	13,82	8,42	0,34	0,21	0,88	1,22
4	1,60	47,05	13,80	6,60	0,29	0,14	0,58	0,89
5	2,10	53,75	14,79	5,79	0,28	0,11	0,38	0,67

Hinweis: Die Ermittlung von l_{opt} wird mit dem analytischen Verfahren durchgeführt.

Die großen erforderlichen Verankerungslängen der Lage 1 lassen den statischen Ansatz dieser Bewehrungslage nicht sinnvoll erscheinen.

Exemplarisch wird in Bild 7.17 und in Bild 7.18 eine Nomogrammbemessung für die 2. Bewehrungslage für zwei verschiedene Sicherheiten γ_B durchgeführt. Es zeigt sich, dass eine sehr gute Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen des analytischen Verfahrens gegeben ist.

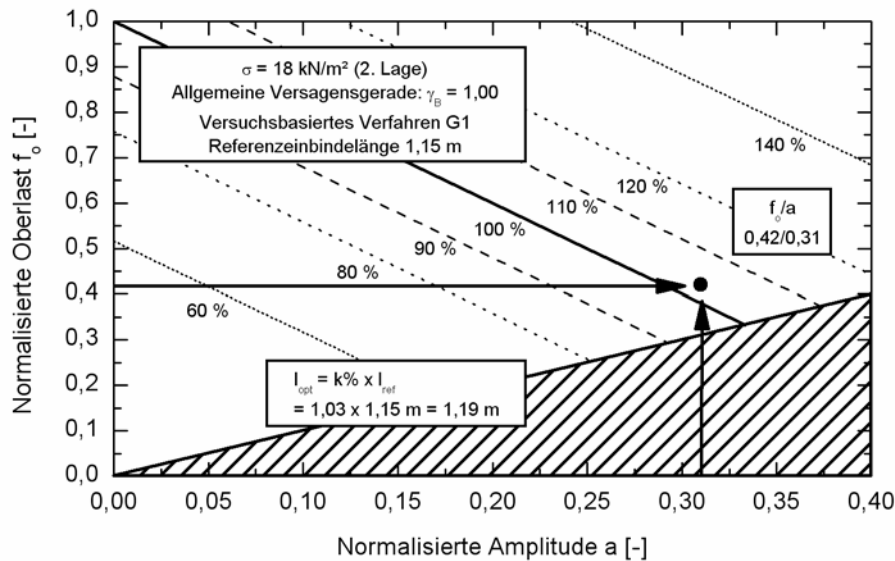


Bild 7.17: Exemplarische Ermittlung der optimalen Einbindelänge für die 2. Bewehrungslage mit einer Sicherheit von $\gamma_B = 1,00$

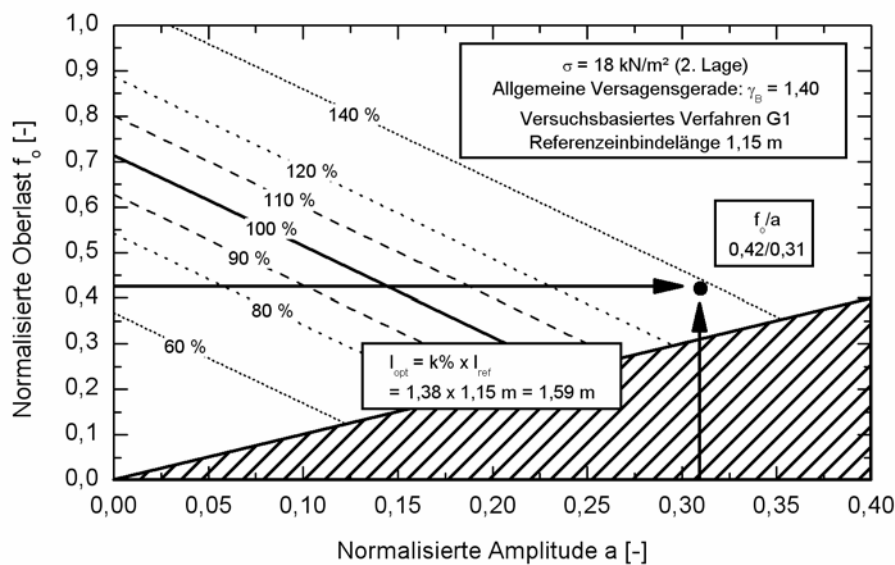


Bild 7.18: Exemplarische Ermittlung der optimalen Einbindelänge für die 2. Bewehrungslage mit einer Sicherheit von $\gamma_B = 1,40$

Im Ergebnis der Betrachtung stehen für die Konstruktion die Beanspruchungen und Widerstände für die Bemessung infolge zyklischer Einwirkungen fest. Es zeigt sich ein sehr schneller Abbau der Wirksamkeit zyklischer Einwirkungen mit der Tiefe, so dass bei der vor-

gegebenen Beanspruchung im Wesentlichen die obersten fünf Bewehrungslagen betrachtet werden müssen.

7.6 Zusammenfassung

In Abschnitt 7.2 wurde zunächst eine für alle durchgeführten zyklischen Modellversuche gültige, lineare Versagensbeziehung in Abhängigkeit des normalisierten Oberlastniveaus, der normalisierten Amplitude und der Lastspielzahl entwickelt. Es konnte gezeigt werden, dass bei der vorliegenden Darstellungsweise der Querstrebenanteil des Geogitters G3 von untergeordneter Bedeutung für das Versagensverhalten ist.

Diese Versagensbeziehung wurde als Grundlage für ein Bemessungskonzept von Verankerungsbereichen unter zyklischer Belastung im Grenzzustand der Tragfähigkeit herangezogen.

Die benötigten statischen Eingangsparameter können im „Abschätzverfahren“ über den Interaktionskoeffizienten oder im „versuchsbasierten Verfahren“ über Regressionskoeffizienten zur Verfügung gestellt werden. Zwei grundsätzliche Berechnungsmethoden zur Bemessung des Verankerungsbereiches unter zyklischer Beanspruchung wurden vorgestellt: Im analytischen Verfahren erfolgt die Bestimmung der optimalen Verankerungslänge bei bekannter zyklischer Beanspruchung in Abhängigkeit der Tiefenlage, der Versagensbeziehung und der Verbundparameter. Diese Methodik lässt sich in vorhandene Bemessungsprogramme einbinden.

Im Nomogrammverfahren werden Nomogramme für vorgegebene Tiefenlagen und Verbundparameter erstellt. Sie lassen sich für beliebige zyklische Beanspruchungen verwenden.

In einem separaten Abschnitt wurden für Verformungsermittlungen und Tragfähigkeitsuntersuchungen Hinweise zur Ermittlung der notwendigen Eingangsdaten in Abhängigkeit der geforderten Genauigkeit gegeben. Dabei sind überschlägliche Verformungs- und Bemessungsabschätzungen bei Annahme einiger Grundparameter bereits ohne Versuchsdurchführungen möglich, während für eine exaktere Bemessung die Ausführung einer statischen Versuchsmatrix unterschiedlicher Vertikalspannungen und Einbindelängen empfohlen wird. Genauere Verformungsaussagen lassen sich über eine Auswahl zyklischer Modellversuche treffen.

Abschließend wurde die Anwendung der hergeleiteten Verfahren durch ein Fallbeispiel einer bewehrten Stützkonstruktion unter einer Eisenbahnverkehrsbelastung verdeutlicht.

8 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

8.1 Zusammenfassung

Geokunststoffe werden in der heutigen Zeit in einer Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten im Bereich des Bauwesens und der Geotechnik verwendet. Vor allem beim Einsatz in Stützkonstruktionen, Erdeinbruchüberbrückungen oder Brückenwiderlagern werden sie neben statischen Einwirkungen Belastungen aus Verkehr, Maschinen oder Baubetrieb ausgesetzt. Im Rahmen des Nachweises der Tragfähigkeit in Fällen, in denen Bewehrungslagen geschnitten werden, sind in der momentanen Bemessungspraxis detaillierte Kenntnisse des Interaktionsverhaltens zwischen Erdstoff und Bewehrungsmaterial erforderlich. Zum Verhalten dieser Systeme unter zyklischen Belastungen liegen dabei bisher nur rudimentäre Erkenntnisse vor. Entsprechende Untersuchungen stellen aufgrund der Beanspruchungssituation besondere Anforderungen an einen Versuchsstand.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die wesentlichen Einflussparameter statischer und zyklischer Art auf das Interaktionsverhalten evaluiert und Methoden zur Beschreibung dieses Verhaltens sowie zur Bemessung entsprechender Konstruktionen entwickelt.

Eine umfassende Literaturlauswertung gibt in Kapitel 2 zunächst einen Überblick über das Tragverhalten geokunststoffbewehrter Konstruktionen mit einem besonderen Fokus auf dem Verankerungsbereich. Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt dabei auf der detaillierten Auswertung statischer Einflussparameter zur Identifizierung der Kernparameter und zur Entwicklung der optimalen Konstruktion eines Versuchsstandes für das Untersuchungsprogramm. Die Literaturlausdaten zyklischer Pull-Out-Versuche sind aufgrund der Vielfalt unterschiedlicher Versuchsdurchführungen nur schwer vergleichbar, so dass zur Extrahierung zyklischer Kernparameter weitergehende Untersuchungen notwendig sind.

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse wurde am Institut für Geotechnik und Markscheidewesen der Technischen Universität Clausthal ein Versuchsstand mit zugehörigem Messsystem geplant und konstruiert, der die bereits in der Literatur untersuchten Randbedingungen optimal berücksichtigt. Dabei ist die zyklische Belastungsaufbringung in vertikaler und horizontaler Achse möglich.

Zur optimalen Analyse zyklischer Einflussparameter wurde in Kapitel 3 ein standardisierter Versuchsablauf entwickelt, der sich aufgrund der höheren Relevanz dieser Einwirkungskomponente auf horizontale Belastungen konzentriert. Der Versuchsablauf erlaubt Aussagen zum Verhalten während einer zyklischen Belastungsphase sowie zum Interaktionsverhalten nach Aufbringung der zyklischen Komponente.

In Kapitel 4 sind eine Vielzahl statischer Index- und Modellversuche mit realitätsnahen Verankerungslängen zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Parameter auf das

Auszugsverhalten bei vorgegebenen Parameterkombinationen durchgeführt worden. Diese Versuche dienen ebenfalls als Referenzversuche für die zyklischen Modellversuche, wobei der Schwerpunkt dabei auf der Ermittlung der maximalen Auszugskraft und der Verschiebungsentwicklung liegt. Die Installation eines umfangreichen Wegmesssystems erlaubt Aussagen über die Verformungsentwicklung und die Lastabtragung im eingebetteten Bewehrungsprodukt.

Als Kernparameter für die maximale Auszugskraft wurden dabei die Kornverteilung und Lagerungsdichte des Erdstoffes, die Einbindelänge der Bewehrung und die Auflast identifiziert, während für die Verschiebungsentwicklung im Wesentlichen die Einbindelänge und die Auflast relevant sind. Diese Erkenntnisse werden bei der normalisierten Darstellungsform der zyklischen Modellversuche verwendet. Die Abschätzung der Lastabtragung und Kraftentwicklung im Bewehrungsmaterial ist bei Kenntnis einer Kraft-Dehnungs-Beziehung und der gemessenen Dehnungen im Probenmaterial möglich. Die überwiegende Lastabtragung erfolgte bei den untersuchten Gitterstrukturen über Mechanismen vor den Querstreben wie „passiver Erdwiderstand“ und „Interlock“.

Die Ergebnisse von mehr als 80 zyklischen Modellversuchen sind in Kapitel 5 zusammengefasst worden. Dabei sind die statischen Einflussparameter Erdstoff, Bewehrungsmaterial, Auflast und Einbindelänge sowie die zyklischen Parameter Oberlastniveau der Lastspiele, Amplitude, Frequenz und Anzahl der Lastspiele variiert worden. Zunächst wurden geeignete Auswertemethoden für die zyklischen Modellversuche vorgestellt. Eine Normalisierung der Eingangsdaten auf die maximale Auszugskraft des statischen Referenzversuches erlaubt dabei implizit die Erfassung statischer Einflussparameter in zyklischen Modellversuchen. Als zyklische Kernparameter erwiesen sich das Oberlastniveau und die Amplitude, während die Größe der Frequenz nur ein marginales Einflusspotenzial besitzt. Eine Zunahme der Verschiebungen war mit steigender Lastspielzahl zu beobachten, wobei aber ein sicherheitsgefährdendes plötzliches Versagen bei Gitterstrukturen aufgrund der Lastabtragungskomponenten nicht beobachtet werden konnte. Die Lastabtragung zyklischer Modellversuche erwies sich im Vergleich zu den entsprechenden statischen Referenzversuchen als gleichmäßiger über die Einbindelänge, da während der Aufbringung der Lastspiele eine Lastumlagerung in hintere Verankerungsbereiche vollzogen wird. Eine Verbesserung des Verbundverhaltens nach Aufbringung der Lastspiele aufgrund von Bodenverdichtungseffekten und einer „zyklischen Bodenverspannung“ wurde ebenfalls beobachtet.

In Kapitel 6 ist durch eine Regressionsanalyse eine Methode zur stufenlosen Abschätzung der Verformungsentwicklung in Abhängigkeit der Amplitude, des Oberlastniveaus und der Lastspielzahl entwickelt worden. Es zeigte sich ein deutlicher Anstieg der Verformungen mit

wachsender Amplitude und steigendem Oberlastniveau, wobei ein deutlich unterschiedliches Verhalten der Geogitter im Bereich höherer Amplituden zu verzeichnen ist.

Um aus den verformungsbasierten Daten eine Aussage zum Grenzverhalten des Systems ableiten zu können, erfolgte die Definition des Versagenskriteriums. Durch eine konkrete Festlegung des Versagenszustandes wurde eine Bemessung des Systems ermöglicht.

Das Verfahren der Datenextrapolation ermöglicht Aussagen über das Systemverhalten bei höheren Lastspielzahlen und damit längeren Lebensdauern. Aufgrund von Versuchsschwankungen und Inkonsistenzen der Horizontalkraft sind umfangreiche Datenüberprüfungen zur Absicherung erforderlich. Die Anwendbarkeit des Verfahrens ist prinzipiell bei jedem zyklischen Modellversuch gegeben. Berechnete Daten können für weitere Auswertungen herangezogen werden.

Die Überführung der vorgestellten Versuchsergebnisse in ein allgemeingültiges Bemessungskonzept im Grenzzustand der Tragfähigkeit erfolgte in Kapitel 7. Auf der sicheren Seite liegend konnten alle durchgeführten Modellversuche in einem Schaubild, in dem ein Versagenszustand in Abhängigkeit des Oberlastniveaus, der Amplitude und der Lastspielzahl definiert wird, zusammengefasst werden. Es wurden ein Nomogramm- und ein analytisches Verfahren entwickelt, mit denen bei bekannten Einwirkungen eine optimale Verankerungslänge für zyklische Einwirkungen in jeder Einbautiefe ermittelt werden kann. Eine Implementierung dieses Ansatzes in ein vorhandenes Bemessungskonzept ist möglich und wurde an einem Beispiel exemplarisch gezeigt.

Weiterhin wurden Tabellen und Ablaufdiagramme für eine bedarfsspezifische Planung eines speziellen Versuchsprogrammes vorgestellt und Hinweise für eine Vordimensionierung einer bewehrten Konstruktion unter zyklischer Belastung ohne jeden Versuchsaufwand gegeben.

8.2 Ausblick

Bei der Bearbeitung der vorgestellten Thematik ergaben sich einige Ansätze, die in Zukunft einer detaillierteren Betrachtung unterzogen werden sollten.

Aufgrund der Notwendigkeit der Durchführung einer großen Anzahl aufwändiger zyklischer Modellversuche konnte bisher nur eine Auswahl von Parameterkombinationen untersucht werden. Die dabei ermittelte Allgemeingültigkeit der normalisierten Ergebnisdarstellung sollte mit weiteren Bewehrungsprodukten und Erdstoffen untermauert werden. Wegen der erheblichen Differenzen in der Lastabtragungskapazität bei den untersuchten Erdstoffen wird die Prüfung eines weiteren Erdstoffes mit einer Kornverteilung empfohlen, die zwischen dem untersuchten Sand- und Kiesmaterial liegt.

In der Literaturlauswertung und in theoretischen Überlegungen ist die vordringliche Relevanz zyklischer Belastungen im horizontalen Bereich ermittelt worden. Bei Vorliegen genauerer Kenntnisse kann eine kombinierte zyklische Belastung in horizontaler und vertikaler Achse untersucht werden, um zu überprüfen, ob es durch diese modifizierte Belastungsanordnung zu Abweichungen von den ermittelten Ergebnissen kommt.

Weiterhin ist eine detailliertere Kenntnisl Gewinnung zur Lastverteilung statischer und zyklischer Einwirkungen im bewehrten Bodenkörper wünschenswert. Wie bereits in der Einführung beschrieben, liegen bislang nur sehr punktuelle Dehnungsmessungen an eingebetteten Geokunststoffen unter zyklischer Belastungseinwirkung vor, aus denen Rückschlüsse auf die tatsächlich im Material vorhandenen Kraftverhältnisse gezogen werden können. Exaktere Beanspruchungsdaten können dabei in Verbindung mit den vorgestellten Verfahren zu Widerstandsbestimmung zu wirklichkeitsnäheren Bemessungsergebnissen führen.

Systematische In-Air-Versuche von Geokunststoffen unter zyklischer Beanspruchung erweitern den materialspezifischen Kenntnisstand. Damit wäre es möglich, auf der Widerstandsseite einer entsprechend beanspruchten Konstruktion nicht nur den Verankerungsbereich adäquat zu untersuchen, sondern auch den Nachweis gegen Bruch der Bewehrung mittels eines zyklischen Anpassungsfaktors A_5 zu modifizieren.

9 Summary

When used in reinforced structures, bridging of voids or abutments geosynthetics are exposed to static and cyclic loadings from traffic, machines and construction work. For the proof of internal stability in these structures detailed knowledge of the interaction behaviour between the geosynthetic and the surrounding soil in the anchorage area is required. No sufficient experience of the behaviour under cyclic loadings is available at the moment.

Initially an extensive experimental framework and a standardised cyclic testing procedure have been evaluated to investigate the behaviour of the materials. Therefore, the development and construction of a new, multifunctional testing device and measuring system has been carried out to perform large scale static and cyclic pull-out tests.

In more than 55 static index- and modeltests the grain size distribution, density of the soil, embedment length of the geosynthetic and the vertical surcharge have been identified as core parameters for the maximum pull-out force. However, for the development of displacements in the geosynthetic specimen, embedment length and surcharge are relevant. Knowledge of the force-elongation-relation of the geosynthetic and the measured elongations in the embedded specimen allows an estimation of the load transference from the geosynthetic in the soil and the development of forces in the specimen. "Passive earth resistance" and "interlock" in front of the transverse bars are the prevailing mechanisms of load transference with grid structures.

In more than 80 cyclic model tests the maximum cyclic load, the amplitude of the cyclic loading and the number of cycles are identified as core parameters. An increase of displacements of the specimen is concomitant with an increasing number of applied cycles. Nevertheless, a hazardous sudden failure was not detected with the grid structures due to their load transference mechanisms. Load transference of cyclic model tests seems to be more consistent over the embedment length than in the static reference tests. This can be explained by a distinctive load transfer in the rear part of the specimen. An improvement of the compound behaviour after application of the cycles due to a "compaction of the soil" and a "cyclic interlock" is monitored.

The database is used for the development of a universal methodology to calculate displacements of the structures depending on the amplitude of the cycles and the maximum cyclic loading. Thereby slight differences are monitored with different geosynthetics and soils. The effects of the core parameters on the displacement behaviour are illustrated by displacement grids. A failure criterion is defined to extract a prediction of the limit state behaviour of the

structure from the displacement-based data. By applying this methodology, a prediction of a stable behaviour or a failure of the specimen is possible.

Based on the presented experimental data, a universal concept for the calculation of the anchorage area of cyclic loaded structures is developed. A nomogram and an analytical method are given with which the optimal cyclic anchorage length can be determined for every layer of a reinforced structure. An implementation of this approach into a given concept is possible and is applied to a sample.

10 Literaturverzeichnis

Abu-Hejleh, N.; Wang, T.; Zornberg, J.G. (2000): Performance of Geosynthetic-Reinforced Walls Supporting Bridge and Approaching Roadway Structures. In: Geotechnical Specialty Conference 2000, Denver, Colorado, 2000; Geotechnical special publication No. 103, ASCE.

Al-Ashou, M.O.; Hanna, T.H. (1990): Deterioration of Reinforced Earth elements under cyclic loading. In: Performance of reinforced soil structures, British Geotechnical Society, 1990

Alfaro, M.C.; Miura, N.; Bergado, D.T. (1995): Soil-geogrid Reinforcement Interaction by Pullout and Direct Shear Tests. In: Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 18, No. 2, June 1995

ASTM 6706 – 01: Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil. American Society for Testing and Materials, Oktober 2001

Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R. (2000): Multivariate Analysemethoden, 9. Auflage, Springer Verlag, 2000

Batereau, C. (1982): Zur Normalspannungsabhängigkeit der Grenzflächenscherfestigkeit. In: Neue Bergbautechnik, 12. Jg., Heft 9, September 1982

Bathurst, R.J.; Cai, Z. (1994): In-Isolation cyclic load-extension behavior of two geogrids. In: Geosynthetics International, 1994, Vol. 1, No. 1, S. 1 - 19

Bauer, G.E.; Abd El Halim, A.O.; Shelton, W.S. (1988): Pull-out resistance of geogrids embedded in granular aggregates. In: Third Canadian Symposium on geosynthetics

Böckmann, F.J. (1991): Modellversuche zur Grenzlastermittlung von Pfahlgruppen. Mitteilungen des Fachgebietes Grundbau, Boden- und Felsmechanik der Universität-Gesamthochschule Kassel, Heft 2, Kassel, 1991

Bolt, A.F.; Duszynska, A. (2000): Pull-Out testing of geogrid reinforcements. In: Proceedings 2nd European Geosynthetics Conference, Bologna, 2000

Bonaparte, R.; Schmertmann, G.R.; Williams, N.D. (1986): Seismic Design of Slopes Reinforced with Geogrids and Geotextiles. In: Proceedings of Third International Conference on Geotextiles, Vienna, 1986, S. 273 - 278

Bonckiewicz, C.; Christopher, B.R.; Atmatzidis, D.K. (1988): Evaluation of Soil-Reinforcement Interaction by Large-Scale Pull-Out Tests. In: Transportation Research Record No. 1188, National Research Council/Transportation Research Board, S. 1 - 18

BS 8006: British Standard BS 8006:1995: Strengthened/reinforced soils and other fills. Hrsg.: Standards Board, Ergänzungen von 1999

Bräu, G.; Bauer, A. (2001): Versuche im Boden mit gering dehnbaren Geogittern. In: Tagungsband zu 7. Informations- und Vortragstagung "Kunststoffe in der Geotechnik", März 2001

Bühl, A.; Zöfel, P. (2002): SPSS 11: Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows. Pearson Education Deutschland GmbH, München, 2002

Chang, D.T.-T.; Sun, T.-S.; Hung, F.-Y. (1995): Pullout Mechanism of Geogrids Unter Confinement by Sandy und Clayes Soils. In: Transportation Research Record No. 1474, National Academy Press, Washington D.C., 1995, S. 64-72

Claybourn, A.F.; Wu, J.T.H. (1993): Geosynthetic-Reinforced Soil Wall Design. In: Geotextiles and Geomembranes 12, 1993, S. 707 - 724

Collin, J.G.; Berg, R.R. (1993): Comparison of short-term and long-term pullout testing of geogrid reinforcements. In: Proceedings "Geosynthetic Soil Reinforcement Testing Procedures", San Antonio, 1993, S. 184 - 194

DIN EN ISO 10319, Ausgabe Juni 1996: Geotextilien, Zugversuch am breiten Streifen (ISO 10319:1993); Deutsche Fassung EN ISO 10319:1996. Hrsg.: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 12957-1 (Entwurf), Ausgabe April 1998: Geotextilien und geotextilverwandte Produkte, Bestimmung der Reibungseigenschaften, Teil 1: Scherkasten-Versuch. Hrsg.: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 13431, Ausgabe:1999-11: Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Bestimmung des Zugkriech- und des Zeitstandbruchverhaltens (ISO 13431:1999); Deutsche Fassung EN ISO 13431:1999. Hrsg.: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 13738 (Entwurf), Ausgabe Februar 2000: Bestimmung des Widerstandes gegen Auszug aus dem Boden. Hrsg.: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 13738, Ausgabe Februar 2005: Bestimmung des Widerstandes gegen Auszug aus dem Boden. Hrsg.: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

EBGEO (1997): Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen, 1997. Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), Ernst & Sohn, Berlin

Eigenbrod, K.D.; Locker, J.G. (1987): Determination of Friction Values for the Design of Side Slopes Lined or Protected With Geosynthetics. In: Canadian Geotechnical Journal, Vol. 24, S. 509-519

Elias, V.; Christopher, B.R.; Berg, R.R. (2001): Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines, Publication No. FHWA-NHI-00-043. NHI – National Highway Institute, Washington D.C., March 2001.

Emersleben, A. (2003): Untersuchungen des Einflusses unterschiedlicher Parameter auf das Herausziehverhalten von Geokunststoffen. Diplomarbeit am Institut für Geotechnik und Markscheidewesen der TU Clausthal (unveröffentlicht)

Empfehlung 6.11: Dynamische Einwirkungen auf Geokunststoffbewehrte Systeme, Entwurf November 2004, Kapitel 6.11 für die Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen (EBGEO)

Fannin, R.J.; Hermann, S. (1991): Creep Measurements on Polymeric Reinforcement. In: Proceedings Geosynthetics '91 Conference, Atlanta, S. 561 - 573

Fannin, R.J.; Hermann, S. (1988): Field behaviour of two instrumented, reinforced soil slopes. In: Int. Geotechnical Symp. on theory and Practice of Earth Reinforcement, Fukuoka, Japan. Herausgeber: Yamanouchi, Miura und Ochiai, Balkema, Rotterdam, S. 277 - 282

Farrag, K.; Acar, Y.B.; Juran, I. (1993): Pull-Out Resistance of Geogrid Reinforcements. In: Geotextiles and Geomembranes 12 (1993), S. 133 - 159

FGSV (1994): Merkblatt für die Anwendung von Geotextilien und Geogittern im Erdbau des Straßenbaus. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Köln, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, FGSV Verlag GmbH

Gartung, E.; Verspohl, J.; Alexiew, D.; Bergmair, F. (1996): Geogrid reinforced railway embankment on piles – Monitoring. In: Geosynthetics: Applications, design and construction, Proceedings of the 5th European Geosynthetics Conference, 1996, Maastricht, S. 251 - 258

Geosynthetics [Market Research, Industry Analysis and Business Forecasts]. Global Information, Inc., Pub. Time: 2002/12

Göbel, C.; Lieberenz, K. (2004): Handbuch Erdbauwerke der Bahnen. Eurailpress, Hamburg, 1. Auflage 2004.

Gotschol, A. (2002): Veränderlich elastisches und plastisches Verhalten nichtbindiger Böden und Schotter unter zyklisch-dynamischer Belastung. In: Schriftenreihe Geotechnik, Universität Gh Kassel, Heft 12, 2002.

Grote, K.-H.; Feldhusen, J. (2004): Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer Verlag, Berlin

Hanna, Th. H.; Touahmia, M. (1991): Comparative Behaviour of Metal and Tensar Geogrid Strips Under Static and Repeated Loading. In: Proceedings Geosynthetics 91 Conference Atlanta, S. 575 - 585

Hartung, J. (2002): Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik, 13. Auflage, Verlag Oldenbourg, München, 2002

Herold, A.; Mannsbart, G. (1997): Dynamisches Schergerät zur Bestimmung des Grenzflächenscherungsverhaltens zwischen Geokunststoffen und Lockergestein. In: Tagungsband zu 5. Informations- und Vortragstagung "Kunststoffe in der Geotechnik", März 1997 in München, S. 135 – 140

Herold, A. (1999): Geokunststoffe unter dynamischer Belastung II. In: Tagungsband zu 6. Informations- und Vortragstagung "Kunststoffe in der Geotechnik", März 1999 in München, S. 69 - 75

Herold, A. (2001): Das erste Straßenbrückenwiderlager in Deutschland als Permanentkonstruktion in der Bauweise KBE-Kunststoffbewehrte Erde. In: Tagungsband zur 7. Informations- und Vortragstagung "Kunststoffe in der Geotechnik", März 2001 in München, S. 113 - 119

Herold, A.; Tamáskovics, N. (2004): Bestimmung von dynamischen Spannungen in Kunststoffbewehrte-Erde-Konstruktionen unter Zuhilfenahme von Kegelmodellen. In: Bautechnik 81 (2004), Heft 9, S. 725 - 733

Ingold, T.S. (1983): Laboratory Pull-Out Testing of Grid Reinforcements in Sand. In: Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 6, No. 3, Sept. 1983, S. 101 - 111

Jewell, R.A. (1996): Soil reinforcement with geotextiles. Thomas Telford, London

Jones, C.J.F.P. (1996): Earth reinforcement & soil structures. Thomas Telford, London

Juran, I.; Knochenmus, G.; Acar, Y.B.; Arman, A. (1988): Pull-out response of geotextiles and geogrids. In: Geosynthetics for soil improvement, ASCE Geotechnical Special Publication, 1988

Kempfert, H.-G.; Stadel, M.; Zaeske, D. (1997): Berechnung von geokunststoffbewehrten Tragschichten über Pfahlelementen. In: Bautechnik 74, Heft 12.

Koerner, R. (1999): Designing with Geosynthetics. Fourth Edition, Prentice Hall, New Jersey

Kutara, K.; Aoyama, N.; Yasunaga, H.; Kato, T. (1988): Long-term pull-out tests of polymer-grids in sand. In: Earth Reinforcement, Herausgeber: Yamanouchi, Miura und Ochiai, Balkema, 1988, S. 117 - 122

Lehnert, J. (1983): Beschreibung einer neu entwickelten Sandfülleinrichtung. In: geotechnik, Heft 1, S. 31-33, 1983

Lin, S.-s.; Liu, C.-l.; Liao, J.-c.; Kuo, S.-h. (1997): Short term pullout tests of geogrid in a compacted lateritic soil. In: Geotechnical Special Publication, No. 69, 1997, S. 543 - 559

Lopes, M.L.; Ladeira, M. (1996): Role of Specimen geometry, soil height and sleeve length on the pull-out behaviour of geogrids. In: Geosynthetics International, 1996, Vol. 3, No. 6, S. 701 - 719

Lopes, M.L.; Ladeira, M. (1996): Influence of the Confinement, Soil Density and Displacement Rate on Soil-Geogrid Interaction. In: Geotextiles and Geomembranes 14, 1996, S. 543 - 554

Martin, J.P., Koerner, R.M., Whitty, J.E. (1984): Experimental Friction Evaluation of Slippage Between Geomembranes, Geotextiles and Soils. In: International Conference on Geomembranes, Denver, USA, S. 191 - 196

McGown, A.; Yeo, K.C.; Yogarajah, I. (1990): Identification of a dynamic interlock mechanism. In: Proc. of International Reinforced Soil Conference, University of Strathclyde, Glasgow, UK, S. 377 – 379

Meyer, N.; Nernheim, A.; Köhler, U. (2004): „Geosynthetic-soil interaction under cyclic loading“. In: Proceedings of the Third European Geosynthetics Conference EuroGeo 3, Munich, 2004, S. 635 - 639

Meyer, N.; Schwerdt, S.; Nernheim, A. (2003): Sicherung von Verkehrswegen in altbergbau- und subrosionsgefährdeten Gebieten durch den Einsatz von Geokunststoffen – Untersuchungen zum Trag- und Reibungsverhalten. In: Tagungsband zum 3. Altbergbau- Kolloquium an der TU Bergakademie Freiberg, S. 332-344

Milligan, G.W.E.; Palmeira, E.P. (1987): Prediction of bond between soil and reinforcement. In: Prediction and Performance in Geotechnical Engineering, Calgary, 1987, Balkema, S. 147 – 153

Min, Y.; Leshchinsky, D.; Ling, H.I.; Kaliakin, V.N. (1995): Effects of Sustained and Repeated Tensile Loads on Geogrid Embedded in Sand. In: Geotechnical Testing Journal, Vol. 18, No. 2, June 1995, S. 204 – 225

Moraci, N.; Romano, G.; Montanelli, F. (2004): Factors affecting the interface apparent coefficient of friction mobilised in pullout conditions. In: Proceedings of the Third European Geosynthetics Conference, Eurogeo 3, Munich, 2004, Vol. I, S. 313-318

Moraci, N.; Montanelli, F. (1997): Behavior of geogrids under cyclic loads. In: Proceedings Geosynthetics '97, S. 961-976

Moraci, N.; Montanelli, F. (1996): Short and long term behaviour of geogrids under static and cyclic load. In: Earth Reinforcement, Herausgeber: Ochiai, Yasufuku & Omine, Balkema, Rotterdam, S. 117-122

Müller-Rochholz, J. (1998): Dynamisches Verhalten von HDPE-Bewehrungsgittern. In: Geotechnik 21, Nr. 4, S. 310 – 313

Müller-Rochholz, J.; Recker, Ch. (1996): Geotextilien - Verformungsverhalten von Geotextilien unter Dauerlast mit Bodenkontakt. Schlussbericht zu Projekt Nr. 20100191, Ministerium für Wissenschaft und Forschungs des Landes Nordrhein-Westfalen

Nimmesgern, M.; Bush, D. (1991): The Effect of Repeated Traffic Loading on Geosynthetic Reinforcement Anchorage Resistance. In: Proceedings Geosynthetics 91 Conference Atlanta, S. 665 - 672

Ochiai, H.; Otani, J.; Hayashi, S.; Hirai, T. (1996): The Pull-Out Resistance of Geogrids in Reinforced Soil. In: Geotextiles and Geomembranes 14 (1996), S. 19 - 42

Ochiai, H.; Hayashi, S.; Otani, J.; Hirai, T. (1992): Evaluation of pull-out resistance of geogrid reinforced soils. In: Earth Reinforcement Practice, Balkema, 1992, S. 141 - 146

Palmeira, E. (1987): The Study of Soil-Reinforcement Interaction by Means of Large Scale Laboratory Tests. PhD Thesis at the University of Oxford, 1987

Raju, M. (1995): Monotonic and Cyclic Pullout Resistance of Geosynthetics. PhD Thesis, The University of Bristish Columbia, 1995

Raju, D.M.; Fannin, R.J. (1997): Monotonic and cyclic pull-out resistance of geogrids. In: Geotechnique 47, No. 2, S. 331 - 337

Rüegger, R.; Hufenus, R. (2003): Bauen mit Geokunststoffen: Ein Handbuch für den Geokunststoff-Anwender. Schweizerischer Verband für Geokunststoffe (SVG). St. Gallen

- Schlosser, F.; Elias, V. (1978): Friction in reinforced earth. In: Proceedings Symposium on Earth Reinforcement, ASCE Annual Convention, Pittsburgh, S. 735 - 763
- Schlosser, F.; Vidal, H. (1969): La terre armée. In: Bull. de Liaison Lab Rout. Ponts et Chaussées, No. 41, November 1969
- Stoewahse, C. (2001): Ermittlung des Reibungsverhaltens von Geokunststoffen und Erdstoffen im Rahmenschergerät. Mitteilungen des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE), Universität Hannover
- Touahmia, M.; Rouili, A.; Hanna, T.H. (1997): A comparison of geogrid strips and metallic reinforcing strips under static and repeated loading. In: Geosynthetics Asia '97, Bangalore, India, S. 337 - 341
- Voskamp, W. (1992): Determination of maximum allowable load and anchorlength of polyester geogrids. In: Earth Reinforcement Practice, Eds. Ochiai, Hayashi & Otani, Balkema
- Watts, G.R.A.; Brady, K.C. (1990): Pull-out tests on geogrids. In: Performance of reinforced soil structures, Proc. of the int. reinforced soil conf., 09/1990, British Geotechnical Society, S. 65-71
- Yasuda, Y.; Nagase, H.; Marui, H. (1992): Cyclic Pull-Out tests of geogrids in soil. In: Earth Reinforcement Practice, Balkema, 1992, S. 185 - 190
- Zaeske, D. (2001): Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen. Schriftenreihe Geotechnik der Universität-Gesamthochschule Kassel, Heft 10, Kassel, 2001
- Zanzinger, H. (2001): Interaktion Boden – Geokunststoff: Scher- und Herausziehversuche. In: „Anforderungen an Geotextilien für Bewehrung“, Geotextil-Fachtagung, Dübendorf, Schweiz, Januar 2001
- Zanzinger, H. (1997): Erfahrungen mit Geogitter-Herausziehversuchen. In: Tagungsband zu 5. Informations- und Vortragstagung "Kunststoffe in der Geotechnik", März 1997 in München, S. 141 - 149

Ziegler, M.; Timmers, V. (2003): Neues Bemessungskonzept für die Bemessung der Verankerungslänge von Geogittern. In: Geotechnik Sonderheft 2003, 8. Informations- und Vortragstagung über "Kunststoffe in der Geotechnik", München, Februar 2003, S. 51 – 60

Verzeichnis der Anhänge

A	Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Kurzzeichen.....	A.I
A.1	Große lateinische Buchstaben	A.I
A.2	Kleine lateinische Buchstaben.....	A.II
A.3	Große griechische Buchstaben	A.III
A.4	Kleine griechische Buchstaben	A.III
A.5	Indizes	A.IV
B	Detailinformationen zu den ausgewerteten Literaturquellen.....	B.I
B.1	Abschnitt 2.5.3.2.2: Einfluss der Auflast.....	B.I
B.2	Abschnitt 2.5.3.2.3: Einfluss der Einbaudichte	B.I
B.3	Abschnitt 2.5.3.2.4: Einfluss der Bodenart	B.II
B.4	Abschnitt 2.5.3.2.5: Einfluss der Bewehrungsbreite	B.II
B.5	Abschnitt 2.5.3.2.7: Einfluss der Schichtdicke.....	B.III
B.6	Abschnitt 2.5.3.2.8: Einfluss der Herausziehgeschwindigkeit	B.III
B.7	Abschnitt 2.5.3.2.9: Einfluss der Nasenlänge.....	B.IV
C	Grundlagen des Untersuchungsprogramms.....	C.I
C.1	Geometriedaten des Geogitters G3 mit unterschiedlichen Querstrebenanteilen	C.I
C.2	Übersicht der ausgeführten statischen Indexversuche.....	C.II
C.3	Übersicht der ausgeführten statischen Modellversuche	C.III
C.4	Übersicht der ausgeführten zyklischen Modellversuche	C.IV
D	Auswertung der statischen Modellversuche.....	D.I
D.1	Einfluss der Auflast.....	D.I
D.2	Lastabtragungsverhalten der Bewehrungsmaterialien	D.III
D.3	Allgemeingültige Verformungsermittlung statischer Auszugsversuche	D.III
D.4	Statische Referenzversuche.....	D.V
E	Auswertung der zyklischen Modellversuche	E.I
E.1	Ablauf der Datenaufbereitung.....	E.I
E.2	Lastabtragung.....	E.V
E.3	Entwicklung der Kriechbeziehungen	E.VII
F	Allgemeingültige Auswertemethodik.....	F.I
F.1	Statische Verschiebungen der Phase 1	F.I
F.2	Ablauf der Regressionsanalyse bei der Verformungsermittlung	F.III
F.3	Zusammenstellung der Regressionsdaten für die Verformungsermittlung.....	F.V
F.4	Überprüfung der Ergebnisqualität der Regression	F.VI
F.5	Visualisierung der zyklischen Verformungen.....	F.VII
F.6	Ermittlung der Gesamtverschiebungen	F.IX
F.7	Visualisierung der Gesamtverschiebungen	F.X
F.8	Durchführung der Extrapolation.....	F.XIV
G	Entwicklung eines Bemessungskonzeptes.....	G.I
G.1	Informationen zum Data Mining.....	G.I
G.2	Konstruktion eines Bemessungsnomogramms	G.V
G.3	Bemessungsbeispiel.....	G.VI

A Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Kurzzeichen

A.1 Große lateinische Buchstaben

A	Absolutwert der Amplitude im zyklischen Versuch
A [*]	Kontaktfläche der Proben im direkten Scherversuch
A _{k%}	Errechneter Absolutwert der Amplitude aus der bezogenen Amplitude bei der Referenzeinbindelänge und der maximalen Auszugskraft bei k% der Referenzeinbindelänge
A _{ur}	Fläche einer Hystereseschleife (Moraci und Montanelli, 1997)
B	Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktion
B1	Probenmaterial: Stahlgitter
D	Lagerungsdichte
F	Horizontale Zugkraft beim Auszugsversuch
F _{B,zykl}	Horizontale zyklische Einwirkung in den Bewehrungslagen der Tiefe z
F _o	Absolutwert des Oberlastniveaus = Maximale Zugkraft im zyklischen Versuch
F _{o,k%}	Errechneter Absolutwert des Oberlastniveaus aus dem bezogenen Oberlastniveau bei der Referenzeinbindelänge und der maximalen Auszugskraft bei k% der Referenzeinbindelänge
F _u	Unterlastniveau = Minimale Zugkraft im zyklischen Versuch
F _p	Maximale Auszugskraft im statischen Versuch = Statische Peakkraft
F _{p,k%}	Maximale statische Auszugskraft bei einer Einbindelänge, die k % der Referenzeinbindelänge beträgt
F _{p,zykl}	Maximale Auszugskraft im Anschluss an den kraftgesteuerten Versuch
F _{skal}	Faktor zur Ermittlung der Abnahme vertikaler zyklischer Spannungen mit der Tiefe (Herold und Tamáskovics, 2004)
G1	Probenmaterial: Gewebtes Geogitter G1
G2	Probenmaterial: Extrudiertes Geogitter G2
G3	Probenmaterial: Gelegtes Geogitter G3
I	Indexversuch: Auszugsversuch im verkleinerten Versuchskasten
I _{ur}	Wiederbelastungsmodul (Moraci und Montanelli, 1997)
K	Erdstoff: Kies 2/12
L	Modellversuch an der Luft (In-Air-Versuch)
M	Modellversuch: Auszugsversuch im großen Versuchskasten
N	Gesamtzahl der aufgebrauchten Lastspiele in einem zyklischen Modellversuch
PI	Gerätetechnisch maximal aufbringbare Kraft im Auszugsversuch (Hanna und Touahmia, 1991)

P_r	Vom Bewehrungsmaterial aufgenommene Zugkraft (Jewell, 1996)
P_s	Aufnehmbare Scherkraft (Jewell, 1996)
P_u	Maximale Horizontalkraft im Auszugsversuch (Hanna und Touahmia, 1991)
P_v	Vertikale Kraft im direkten Scherversuch (Jewell, 1996)
S^*	Scherkraft im direkten Scherversuch
S	Erdstoff: Sand 0/4
$S1$	Probenmaterial: Stahlblech
WA	Wegaufnehmer im Auszugsversuch
Z	Zyklischer Modellversuch im großen Versuchskasten

A.2 Kleine lateinische Buchstaben

a	Auf F_p bezogene Amplitude im zyklischen Versuch
b	Breite der Probe im Auszugsversuch
c_s	Kohäsion bei einer Normalspannung von Null
c_{sg}	Strukturfestigkeit bei einer Normalspannung von Null
f	Frequenz der aufgebrachten Lastspiele
f	Regressionskoeffizient für die Ermittlung der maximalen Auszugskraft mit dem versuchsbasierten Verfahren
f_g	Reibungsverhältnis
f_o	Auf F_p bezogenes Oberlastniveau im zyklischen Versuch
f_{sg}	Auflastunabhängiger Grenzflächenreibungsbeiwert bzw. Interaktionskoeffizient
f_u	Auf F_p bezogenes Unterlastniveau im zyklischen Versuch
g	Regressionskoeffizient für die Ermittlung der maximalen Auszugskraft mit dem versuchsbasierten Verfahren
h	Regressionskoeffizient für die Ermittlung der maximalen Auszugskraft mit dem versuchsbasierten Verfahren
k_0	Erdruchedruckbeiwert
l	Einbindelänge der Probe im Auszugsversuch
$l_{k\%}$	Einbindelänge der Probe, die k% der Referenzeinbindelänge entspricht
l_{opt}	Optimale Einbindelänge bei der zyklischen Bemessung, so dass für die gegebene Einwirkungskombination genau ein Punkt auf der Versagensgerade erzeugt wird
l_v	Vertikaler Abstand der Bewehrungslagen in einer bewehrten Stützkonstruktion
m	Von der Materialkombination abhängiger Zusatzterm bei der Prognose der zyklischen Verschiebungen der Versuchsphase 2
n	Aktuelles Lastspiel
s	Verformung bzw. Verschiebung

\bar{s}	Mittels Extrapolation ermittelte Verformung bzw. Verschiebung
s_p	Verschiebung zum Zeitpunkt des Erreichens von F_p (ohne Angabe handelt es sich um die erste instrumentierte Querstrebe der Probe)
$s_{p, \text{zykl}}$	Verschiebung zum Zeitpunkt des Erreichens von $F_{p, \text{zykl}}$ (ohne Angabe handelt es sich um die erste instrumentierte Querstrebe der Probe)
s_{stat}	Verschiebung während eines statischen Versuches
s_{start}	Verschiebung eines Wegaufnehmers während der Phase 1 des zyklischen Modellversuches
s_{zykl}	Verschiebung eines Wegaufnehmers während der Phase 2 des zyklischen Modellversuches
t	Zeit
\bar{y}	Mittelwert einer Datenbasis
\hat{y}_i	Mit einer Regressionsfunktion geschätzte Werte

A.3 Große griechische Buchstaben

Δd_c	Verschiebungsinkrement am geklemmten Probenende (Raju, 1995)
$\Delta \varepsilon_{i/i+1, n}$	Dehnungsänderung pro Lastspiel zum Zeitpunkt des Lastspieles n zwischen i -ter und $(i+1)$ -ter instrumentierter Querstrebe
ΔF	Kraftzunahme im Probenmaterial in der Phase 2 des zyklischen Modellversuches
ΔF_{Stat}	Horizontalkraftzunahme des statischen Referenzversuches während einer vorgegebenen Verschiebungsänderung $\Delta_{s, \text{Stat}}$
ΔF_{Phase3}	Horizontalkraftzunahme des zyklischen Modellversuches zu Beginn des Anschlussherausziehens während einer vorgegebenen Verschiebungsänderung $\Delta_{s, \text{Phase3}}$
ΔF_d	Zyklische Horizontalkräfte (Yasuda et al., 1992)
$\Delta \sigma$	Zyklische Auflastkomponente (Yasuda et al., 1992)
$\Delta s_{i, n}$	Verformung pro Lastspiel zum Zeitpunkt des Lastspieles n an der i -ten instrumentierten Querstrebe = Inkrement der Verformung
$\Delta_{s, \text{Phase3}}$	Vorgegebene Verschiebungsänderung zu Beginn des Anschlussherausziehens in der Phase 3 des zyklischen Modellversuches
$\Delta_{s, \text{Stat}}$	Vorgegebene Verschiebungsänderung im statischen Referenzversuch

A.4 Kleine griechische Buchstaben

α	Regressionskoeffizienten für die statische Verschiebungsberechnung
----------	--

β	Regressionskoeffizienten für den zyklischen Verschiebungsanteil bzw. zur Ermittlung des Verlaufes der Verschiebungsincremente
$\varepsilon(n)$	Dehnung zum Zeitpunkt des Lastspiels n
$\varepsilon_{i/i+1,n}$	Materialdehnung zwischen i -ter und $(i+1)$ -ter instrumentierter Querstrebe
γ	Einbauwichte des Bodens
γ_B	Teilsicherheitsbeiwert gegen Auszug aus dem Boden
γ_G	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Lasten
γ_Q	Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Lasten
η	Konstanten zur Beschreibung der Versagensgerade
φ_s	Reibungswinkel des Erdstoffes
φ_{sg}	Reibungswinkel zwischen Geokunststoff und Erdstoff
$\xi(n)$	Kriecherhöhungsfaktor zum Zeitpunkt des Lastspiels n
θ	Winkel zwischen einer Bewehrungslage und der Vertikalen im direkten Scherversuch (Jewell, 1996)
σ	Auflastspannung bzw. Normalspannung
σ_b	Horizontale Spannung vor den Querstreben (Jewell, 1996)
$\sigma_{k,zykl}$	Vertikale zyklische Einwirkung in unterschiedlichen Tiefenlagen z
$\sigma_{k,zykl,h}$	Horizontale zyklische Einwirkung in unterschiedlichen Tiefenlagen z
$\sigma_{k,zykl,max,z=0}$	Zyklische Einwirkung in der Lasteinleitungsebene
$\tau_s(\sigma)$	Scherfestigkeit bei der Normalspannung σ
$\tau_{sg}(\sigma)$	Grenzflächenscherfestigkeit bei der Normalspannung σ
τ_p	Maximale Auszugsspannung

A.5 Indizes

g	Geokunststoff (g = geosynthetic)
i	Nummer des Wegaufnehmers (0 bzw. 00 für Wegaufnehmer im freien Bereich)
$k\%$	Wert wird angegeben in Bezug auf die Referenzeinbindelänge von 100 %
n	Aktuelles Lastspiel
p	Pull-Out = Zustand der Herausziehens der Probe im statischen Versuch
s	Erdstoff (s = soil)
start	Daten aus der Phase 1 des zyklischen Modellversuches
stat.	Daten aus einem statischen Versuchsteil
zykl.	Daten aus der Phase 2 des zyklischen Modellversuches

B Detailinformationen zu den ausgewerteten Literaturquellen

B.1 Abschnitt 2.4.3.2.2: Einfluss der Auflast

Autor	Alfaro, 1995	Bauer, 1986	Berg, 1990	Bold, 2001	Bonczkiewicz, 1988	Bräu, 2001	Farrag, 1993	Lin, 1997	Lopes, 1997
Bewehrung	SR 80	SR 2	verschiedene	SS 40	verschiedene	verschiedene	SR 2	SR 80	SR 55
Bewehrungsmaße (l x b) [m]	0,96 x 0,44	0,75 x 0,2	---	1,50 x 0,40	1,07 x 0,51	---	1,00 x 0,30	0,9 x 0,36	0,96 x 0,33
Geschwindigkeit [mm/min]	1	1	1	2	0,1	---	6	1	5,4
Kastenmaße (l x b x h) [m]	1,5 x 0,6 x 0,4	1,0 x 0,2 x 0,4	2,10 x 0,9 x 0,5	1,6 x 0,6 x 0,6	1,3 x 0,7 x 0,45	0,5 x 0,5 x 0,25	1,5 x 0,9 x 0,8	1,5 x 0,9 x 0,84	1,53 x 1,0 x 0,8
Bodenart	Kies	Sandiger Kies	concrete sand	Rybaki Sand	Fine Sand	enggestufter Sand	Mittelsand	Laterit	kiesiger Sand
D10 [mm]	---	---	---	0,61	0,1	---	0,26	---	0,35
D50 [mm]	---	4,474	---	1,19	0,3	---	0,4	---	1,2
Scherwinkel [°]	---	43	31	33 - 37	35	---	---	38,7	37,6 - 43,0
Einbaudichte [kN/m³]	18,9	19,5	18,3	16,7	16,7	15,5	16,4	15,0	17,5
Lagerungsdichte [-]	0,95	---	0,86	0,38	0,96	0,50	0,44	0,94	0,50
Lockerste Lagerung [kN/m³]	14,3	---	---	15,8	---	14,1	15,6	---	16,1
Dichteste Lagerung [kN/m³]	19,1	---	---	18,2	---	17,0	17,4	---	18,9

B.2 Abschnitt 2.4.3.2.3: Einfluss der Einbaudichte

Autor	Bold, 2001	Farrag, 1993	Lin, 1997	Lopes, 1997
Bewehrung	SS 40	SR 2	SR 80	SR 55
Bewehrungsmaße (l x b) [m]	1,60 x 0,40	1,00 x 0,30	0,9 x 0,36	0,96 x 0,33
Auflast [kN/m²]	25	48,2	20	46,7
Geschwindigkeit [mm]	2	4	1	5,4
Kastenmaße (l x b x h) [m]	1,6 x 0,6 x 0,6	1,52 x 0,9 x 0,76	1,52x0,91x0,84	1,53 x 1,00 x 0,8
Bodenart	Rybaki Sand	Mittelsand	Laterit	kiesiger Sand
D10 [mm]	0,61	0,26	---	0,35
D50 [mm]	1,19	0,4	---	1,2
Scherwinkel [°]	33 - 37	---	38,7	37,6 - 43,0
Einbaudichte [kN/m³]	16,7	16,4	14,97	17,5
Lagerungsdichte [-]	0,38	0,44	0,94	0,50
Lockerste Lagerung [kN/m³]	15,8	15,6	---	16,1
Dichteste Lagerung [kN/m³]	18,2	17,4	----	18,9

B.3 Abschnitt 2.4.3.2.4: Einfluss der Bodenart

Autor	Chang, 2000	Bonczkiewicz, 1988	Bräu, 2001
Bewehrung	SR 110	verschiedene	verschiedene
Bewehrungsbreite [m]	1,00 x 0,20	1,07 x 0,51	---
Auflast [kN/m ²]	50	---	---
Geschwindigkeit [mm]	1	0,1	---
Kastenmaße (l x b x h) [m]	1,5 x 0,9 x 0,8	1,3 x 0,7 x 0,45	0,5 x 0,5 x 0,25
Bodenart	Flusssand	Fine Sand	enggestufter Sand
D10 [mm]	0,17	0,1	---
D50 [mm]	0,35	0,3	---
Scherwinkel [°]	42,3	35	---
Einbaudichte [kN/m ²]	16,6	16,7	15,5
Lagerungsdichte [-]	0,8	0,96	0,50
Lockerste Lagerung [kN/m ²]	14,2	--	14,1
Dichteste Lagerung [kN/m ²]	17,2	---	17,0

B.4 Abschnitt 2.4.3.2.5: Einfluss der Bewehrungsbreite

Autor	Bold, 2001	Chang, 2000	Farrag, 1993	Lopes, 1997	Ochiai, 1996
Bewehrung	SS 40	SR 110	SR 2	SR 55	einaxial
Bewehrungsbreite [m]	1,5	1	1	0,96 x 0,33	1,59
Auflast [kN/m ²]	25	50	48,2	46,7	75
Geschwindigkeit [mm]	2	1	4	5,4	1
Kastenmaße (l x b x h) [m]	1,6 x 0,6 x 0,6	1,5 x 0,9 x 0,8	1,52 x 0,9 x 0,76	1,53 x 1,00 x 0,8	0,6 x 0,4 x 0,4
Bodenart	Rybaki Sand	Flussand	Mittelsand	Kiesiger Sand	Toyoura Sand
D10 [mm]	0,61	0,17	0,26	0,35	---
D50 [mm]	1,19	0,35	0,4	1,2	---
Scherwinkel [°]	33 - 37	42,3	---	37,6 - 43,0	---
Einbaudichte [kN/m ²]	16,7	16,6	16,7	17,5	---
Lagerungsdichte [-]	0,38	0,8	0,6	0,5	0,8
Lockerste Lagerung [kN/m ²]	15,8	14,2	15,6	16,1	e = 0,971
Dichteste Lagerung [kN/m ²]	18,2	17,2	17,4	18,9	e = 0,601

B.5 Abschnitt 2.4.3.2.7: Einfluss der Schichtdicke

Autor	Farrag, 1993	Lopes, 1997
Bewehrung	SR 2	SR 55
Bewehrungsbreite [m]	1,00 x 0,30	0,96 x 0,33
Auflast [kN/m ²]	48,2	46,7
Geschwindigkeit [mm]	20	5,4
Kastenmaße (l x b x h) [m]	1,52 x 0,9 x 0,76	1,53 x 1,00 x 0,8
Bodenart	Mittelsand	Kiesiger Sand
D10 [mm]	0,26	0,35
D50 [mm]	0,4	1,2
Scherwinkel [°]	---	37,6 - 43,0
Einbaudichte [kN/m ³]	16,4	17,5
Lagerungsdichte [-]	0,44	0,5
Lockerste Lagerung [kN/m ³]	15,6	16,1
Dichteste Lagerung [kN/m ³]	17,4	18,9

B.6 Abschnitt 2.4.3.2.8: Einfluss der Herausziehggeschwindigkeit

Autor	Bold, 2001	Chang, 2000	Farrag, 1993	Lopez, 1997
Bewehrung	SS 40	SR 110	SR 2	SR 55
Bewehrungsbreite [m]	1,50 x 0,40	1,00 x 0,20	1,00 x 0,30	0,96 x 0,33
Auflast [kN/m ²]	25	50	48,2	46,7
Kastenmaße (l x b x h) [m]	1,6 x 0,6 x 0,6	1,5 x 0,9 x 0,8	1,52 x 0,9 x 0,76	1,53 x 1,00 x 0,8
Bodenart	Rybaki Sand	Flusssand	Mittelsand	Kiesiger Sand
D10 [mm]	0,61	0,17	0,26	0,35
D50 [mm]	1,19	0,35	0,4	1,2
Scherwinkel [°]	33 – 37	42,3	---	37,6 - 43,0
Einbaudichte [kN/m ³]	16,7	16,6	16,4	17,5
Lagerungsdichte [-]	0,38	0,8	0,44	0,5
Lockerste Lagerung [kN/m ³]	15,8	14,2	15,6	16,1
Dichteste Lagerung [kN/m ³]	18,2	17,2	17,4	18,9

B.7 Abschnitt 2.4.3.2.9: Einfluss der Nasenlänge

Autor	Bold, 2001	Chang, 2000	Farrag, 1993	Lopez, 1997
Bewehrung	SS 40	SR 110	SR 2	SR 55
Bewehrungsbreite [m]	1,50 x 0,40	1,00 x 0,20	1,00 x 0,30	0,96 x 0,33
Auflast [kN/m ²]	25	50	48,2	46,7
Geschwindigkeit [mm]	2	1	20	5,4
Kastenmaße (l x b x h) [m]	1,6 x 0,6 x 0,6	1,5 x 0,9 x 0,8	1,52 x 0,9 x 0,76	1,53 x 1,00 x 0,8
Bodenart	Rybaki Sand	Flusssand	Mittelsand	Kiesiger Sand
D10 [mm]	0,61	0,17	0,26	0,35
D50 [mm]	1,19	0,35	0,4	1,2
Scherwinkel [°]	33 – 37	42,3	---	37,6 - 43,0
Einbaudichte [kN/m ³]	16,7	16,6	16,4	17,5
Lagerungsdichte [-]	0,38	0,8	0,44	0,5
Lockerste Lagerung [kN/m ³]	15,8	14,2	15,6	16,1
Dichteste Lagerung [kN/m ³]	18,2	17,2	17,4	18,9

C Grundlagen des Untersuchungsprogramms

C.1 Geometriedaten des Geogitters G3 mit unterschiedlichen Querstrebenanteilen

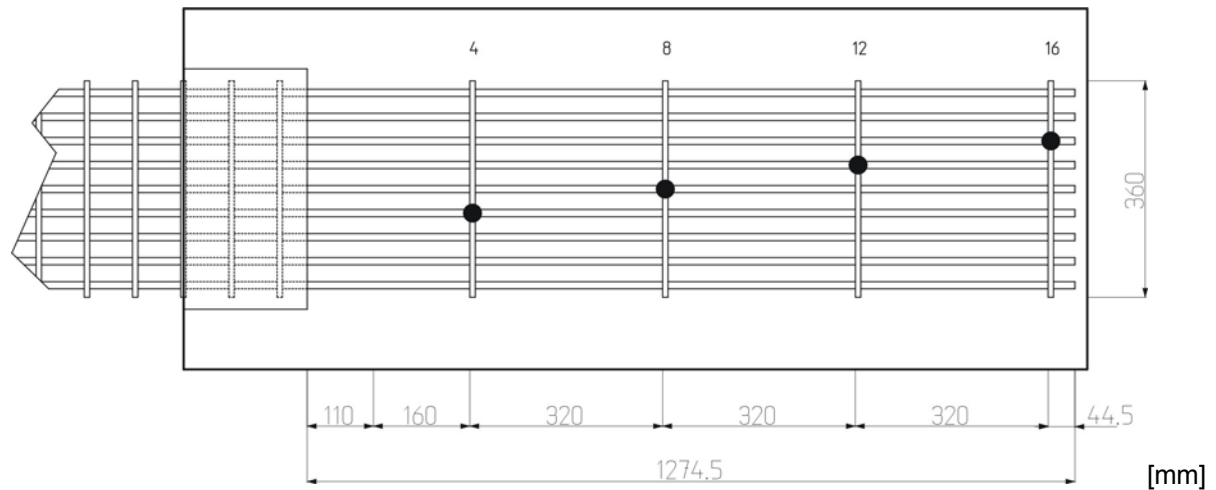


Bild C.1: Geometriedaten des Geogitters G3 mit einem Querstrebenanteil von 25 %

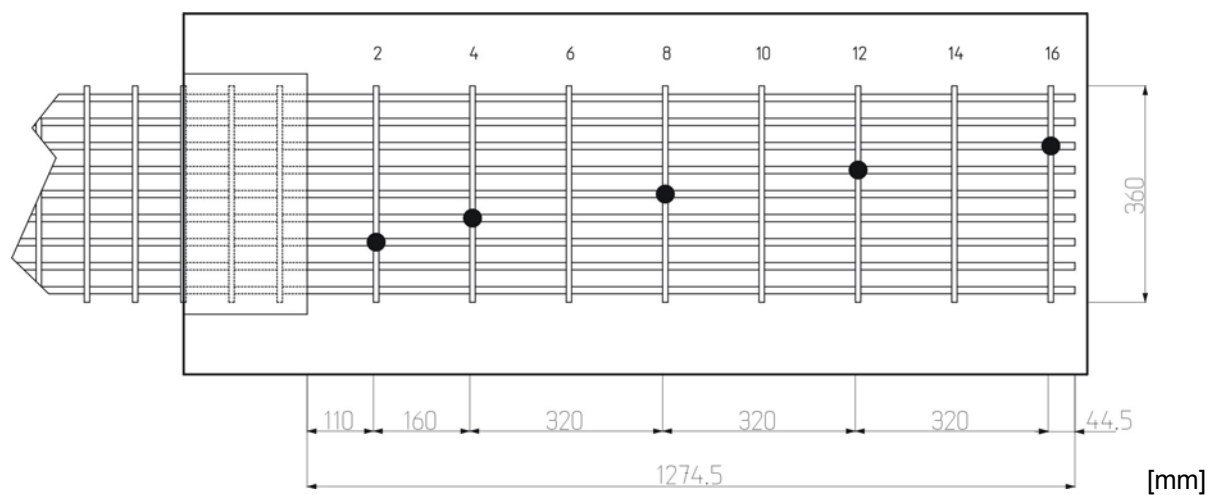


Bild C.2: Geometriedaten des Geogitters G3 mit einem Querstrebenanteil von 50 %

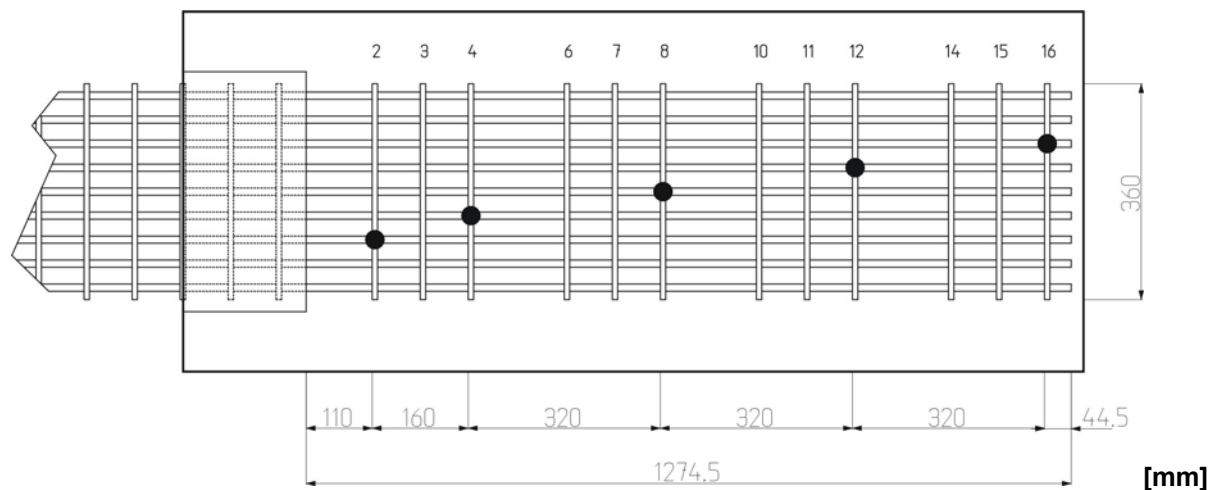


Bild C.3: Geometriedaten des Geogitters G3 mit einem Querstrebenanteil von 75 %

C.2 Übersicht der ausgeführten statischen Indexversuche

Bewehrungsmaterial	Auflast [kN/m ²]	Dichte [g/cm ³]	Versuchsnummer
Gewehtes Geogitter G1	30	1,70	I S G1 01
		1,75	I S G1 02
		1,80	I S G1 03
	45	1,70	I S G1 04
		1,75	I S G1 05
		1,80	I S G1 06
	60	1,70	I S G1 07
		1,75	I S G1 08
		1,80	I S G1 09
Gestrecktes Geogitter G2	30	1,70	I S G2 01
		1,75	I S G2 02
		1,80	I S G2 03
	45	1,70	I S G2 04
		1,75	I S G2 05
		1,80	I S G2 06
	60	1,70	I S G2 07
		1,75	I S G2 08
		1,80	I S G2 09
Stahlblech	15	1,80	I S S1 01
	30	1,70	I S S1 02
		1,75	I S S1 03
		1,80	I S S1 04
	60	1,80	I S S1 05
	128	1,80	I S S1 06
Summe der durchgeführten Indexversuche			24

Alle Indexversuche wurden mit Sand 0/4 und einem Querstrebenanteil von 100 % bei einer Einbindelänge von 0,50 m durchgeführt.

I Indexversuch

S Sand 0/4

G1 Gewebtes Geogitter

G2 Gerecktes Geogitter

S1 Stahlblech, glatt

C.3 Übersicht der ausgeführten statischen Modellversuche

Bewehrungs- material	Erdstoff	Auflast [kN/m²]	Einbinde- länge [m]	Querstre- benanteil [%]	Versuchs- nummer
Gewebtes Geogitter G1	Sand 0/4	15	1,17	100	M S G1 01
		30	0,65	100	M S G1 02
			0,95	100	M S G1 03
			1,17	100	M S G1 04
			1,30	100	M S G1 05
		60	1,17	100	M S G1 06
		75	1,17	100	M S G1 07
		45	1,17	100	M S G1 08*
	Kies 2/12	0	1,17	100	M K G1 01
		5	1,17	100	M K G1 02
		10	1,17	100	M K G1 03
					M K G1 03a
Gerecktes Geogitter G2	Sand 0/4	15	1,15	100	M S G2 01
		30	0,65	100	M S G2 02
			0,95	100	M S G2 03
			1,15	100	M S G2 04
					M S G2 04a
		53	1,15	100	M S G2 05
	Kies 2/12	0	1,15	100	M K G2 01
		5	1,15	100	M K G2 02
		10	1,15	100	M K G2 03
					M K G2 04
	--	--	--	100	M L G2 01
	Gelegtes Geogitter G3	Sand 0/4	30	1,15	100
45			25		M S G3 02
			50		M S G3 03
			75		M S G3 04
			100		M S G3 05
60			100		M S G3 06
Stahlgitter	Sand 0/4	30	1,08	100	M S B1 01
			1,25	100	M S B1 02
Stahlblech	Sand 0/4	150	1,25	--	M S S1 01
Summe der durchgeführten statischen Modellversuche					32

Graue Felder: Referenzversuche für die zyklischen Modellversuche

*: Zusätzliche Verschiebungsmessung im Bereich der freien Länge.

M Modellversuch

S Sand 0/4

K Kies 2/12

L Modellversuch an der Luft (In-Air-Versuch)

G1 Gewebtes Geogitter

G2 Gerecktes Geogitter

G3 Gelegtes Geogitter

B1 Stahlgitter

S1 Stahlblech, glatt

C.4 Übersicht der ausgeführten zyklischen Modellversuche

Bewehrungs- material	Erdstoff	Auflast [kN/m ²]	Quer- streben- anteil [%]	Bezo- genes O- berlast- niveau	Bezo- gene Ampli- tude	Fre- quenz [Hz]	Last- spiele	Versuchs- Nummer
Gewebtes Geogitter G1	Sand 0/4	30	100	0,747	0,123	1	~ 5700	Z G1 S 01
				0,679	0,138		10000	Z G1 S 02
				0,556	0,110		10000	Z G1 S 03
				0,530	0,147		10000	Z G1 S 04
				0,470	0,231		10000	Z G1 S 05
				0,873	0,114		~ 7900	Z G1 S 06
				0,809	0,066		10000	Z G1 S 07
				0,499	0,219		10000	Z G1 S 08
				0,396	0,149		100000	Z G1 S 09
				0,584	0,304		10000	Z G1 S 10
				0,694	0,076		10000	Z G1 S 11
				0,706	0,029		10000	Z G1 S 12
	Kies 2/12	10	100	0,476	0,127	1	10000	Z G1 K 01
				0,636	0,072			Z G1 K 02
				0,426	0,199			Z G1 K 03
				0,715	0,017			Z G1 K 04
				0,612	0,118			Z G1 K 05
				0,616	0,108			Z G1 K 06
				0,493	0,243			Z G1 K 07
				0,719	0,132			Z G1 K 08
Gerecktes Geogitter G2	Sand 0/4	30	100	0,272	0,035	1	1000	Z G2 S 01
				0,553	0,031	1	1000	Z G2 S 02
				0,520	0,104	1	10000	Z G2 S 03
				0,512	0,140	1	10000	Z G2 S 04
				0,410	0,128	0,5	10000	Z G2 S 05
				0,326	0,078	1	10000	Z G2 S 06
				0,424	0,166	1	10000	Z G2 S 07
				0,590	0,029	1	10000	Z G2 S 08
				0,689	0,118	1	10000	Z G2 S 09
				0,779	0,014	1	10000	Z G2 S 10
				0,787	0,079	1	10000	Z G2 S 11
				0,632	0,246	1	~ 5300	Z G2 S 12
				0,556	0,191	1	10000	Z G2 S 13
				0,335	0,057	1	50000	Z G2 S 14
				0,553	0,073	0,2	10000	Z G2 S 15
				0,571	0,116	1	100000	Z G2 S 16
				0,355	0,148	0,2	10000	Z G2 S 17
				0,390	0,087	2,5	10000	Z G2 S 18
				0,674	0,051	0,2	10000	Z G2 S 19
				0,413	0,177	1	100000	Z G2 S 20
				0,591	0,054	2,5	10000	Z G2 S 21
				0,642	0,179	1	~ 4500	Z G2 S 22
				0,425	0,139	2,5	10000	Z G2 S 23
				0,563	0,169	1	10000	Z G2 S 24
				0,697	0,080	1	10000	Z G2 S 25
				0,395	0,119	1	10000	Z G2 S 26
				0,423	0,137	1	10000	Z G2 S 27
				0,538	0,165	0,2	10000	Z G2 S 28
				0,556	0,298	1	~ 9000	Z G2 S 29

		53	100	0,621	0,295	1	~ 170	Z G2 S 30
				0,553	0,167	1	10000	Z G2 S 33*
				0,515	0,124	1	10000	Z G2 S 34*
				0,391	0,188	1	10000	Z G2 S 31
				0,462	0,067	1		Z G2 S 32
	Kies 2/12	10	100	0,697	0,057	1	10000	Z G2 K 01
				0,550	0,124		10000	Z G2 K 02
				0,576	0,122		10000	Z G2 K 03
				0,543	0,151		10000	Z G2 K 04
				0,666	0,109		10000	Z G2 K 05
				0,461	0,205		10000	Z G2 K 06
				0,548	0,215		~ 1900	Z G2 K 07
	--	--	100	--	--	1	10000	Z G2 L 01
Gelegtes Geogitter G3	Sand 0/4	45	50	0,463	0,102	1	10000	Z G3 S 01
				0,450	0,215			Z G3 S 02
				0,469	0,237			Z G3 S 03
				0,622	0,261			Z G3 S 04
				0,607	0,207			Z G3 S 05
				0,623	0,098			Z G3 S 06
				0,778	0,105			Z G3 S 07
				0,795	0,180			Z G3 S 08
			100	0,516	0,131	1	10000	Z G3 S 09
				0,574	0,257			Z G3 S 10
				0,469	0,110			Z G3 S 11
				0,611	0,100			Z G3 S 12
				0,789	0,102			Z G3 S 13
				0,794	0,182			Z G3 S 14
				0,473	0,222			Z G3 S 15
Stahlgitter	Sand 0/4	30	100	0,586	0,242	1	~ 6000	Z B1 S 01
				0,571	0,112		10000	Z B1 S 02
				0,584	0,171		10000	Z B1 S 03
Stahlblech	Sand 0/4	150	--	0,586	0,147	1	1000	Z S1 S 01
				0,589	0,206		10000	Z S1 S 02
				0,613	0,292		10000	Z S1 S 03
Summe der durchgeführten zyklischen Modellversuche								81

* Die gekennzeichneten zyklischen Modellversuche Z G2 S 33/Z G2 S 34 wurden statt der in Abschnitt 3.3 angegebenen Einbindelänge von 1,15 m mit einer Einbindelänge von 0,92 m durchgeführt.

Z Zyklischer Modellversuch

S Sand 0/4

K Kies 2/12

L Modellversuch an der Luft (In-Air-Versuch)

G1 Gewebtes Geogitter

G2 Gerecktes Geogitter

G3 Gelegtes Geogitter

B1 Stahlgitter

S1 Stahlblech, glatt

D Auswertung der statischen Modellversuche

D.1 Einfluss der Auflast

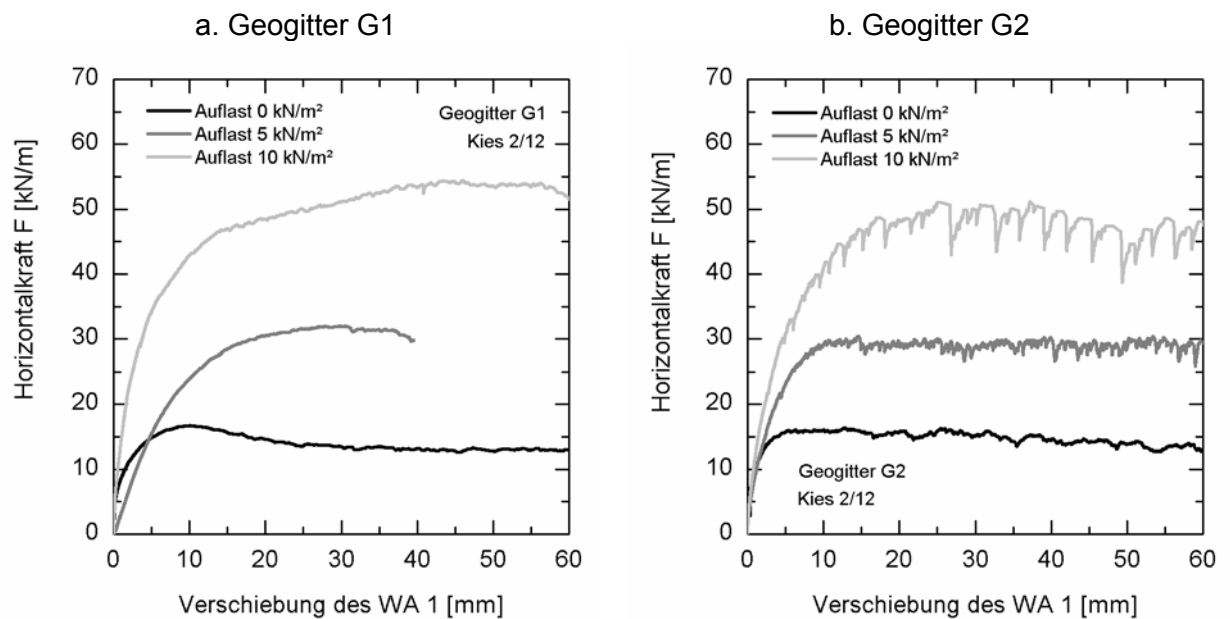


Bild D.1: Entwicklung der Horizontalkraft in Abhängigkeit der Auflast für die untersuchten Geogitter in einem Kies 2/12

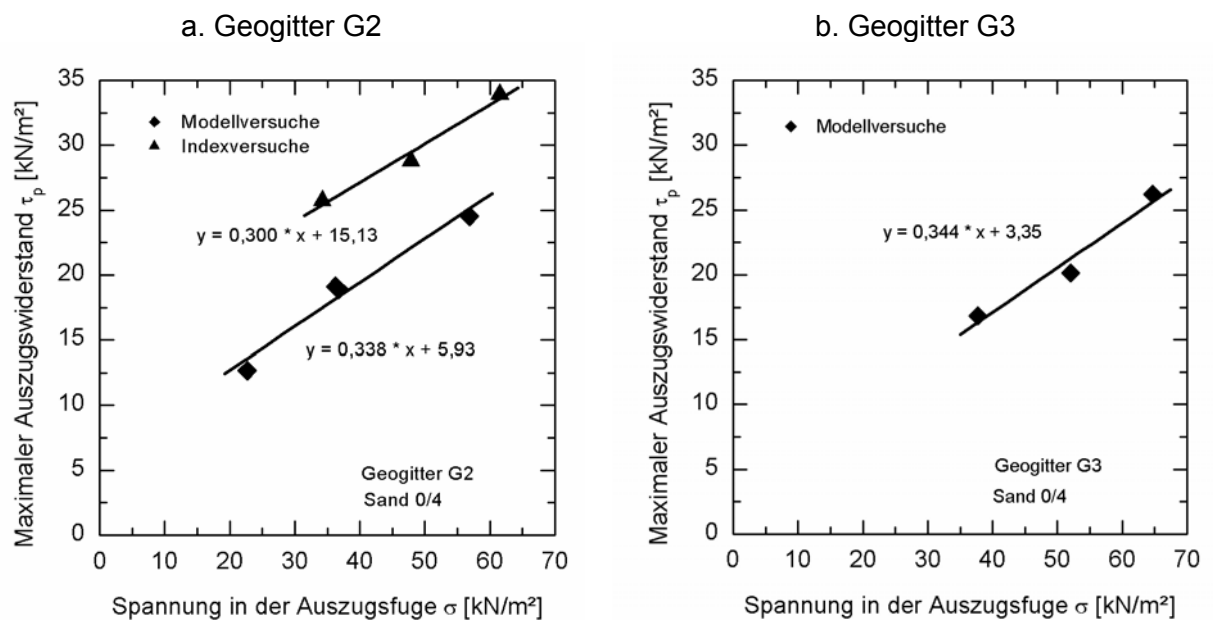
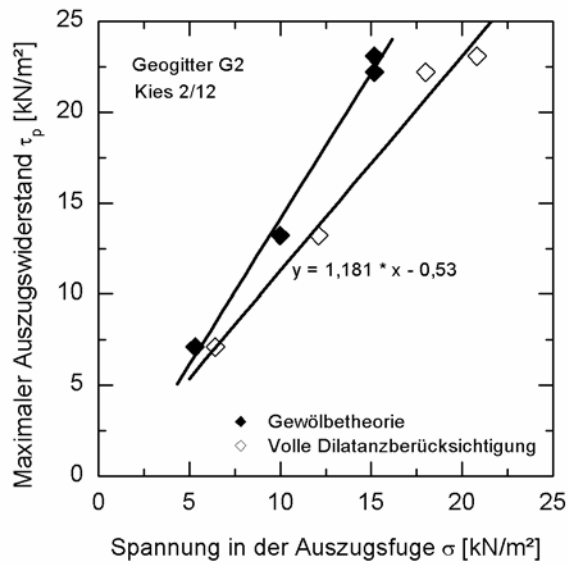
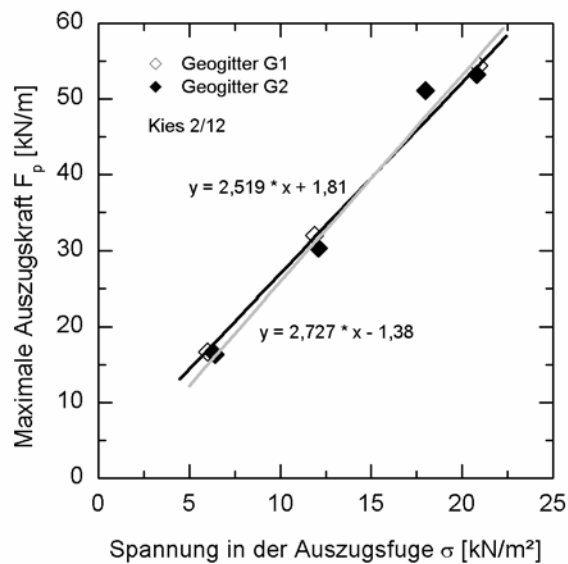


Bild D.2: Maximaler Auszugswiderstand bei Geogittern G2 und G3 im Sand 0/4

**Bild D.3:**

Maximaler Auszugswiderstand bei Kies 2/12 in Abhängigkeit der verwendeten Theorie zur Berechnung der Spannung in der Auszugsfuge

**Bild D.4:**

Maximale Auszugskraft bei Kies 2/12 in Abhängigkeit der Spannung in der Auszugsfuge (Volle Dilatanzberücksichtigung)

D.2 Lastabtragungsverhalten der Bewehrungsmaterialien

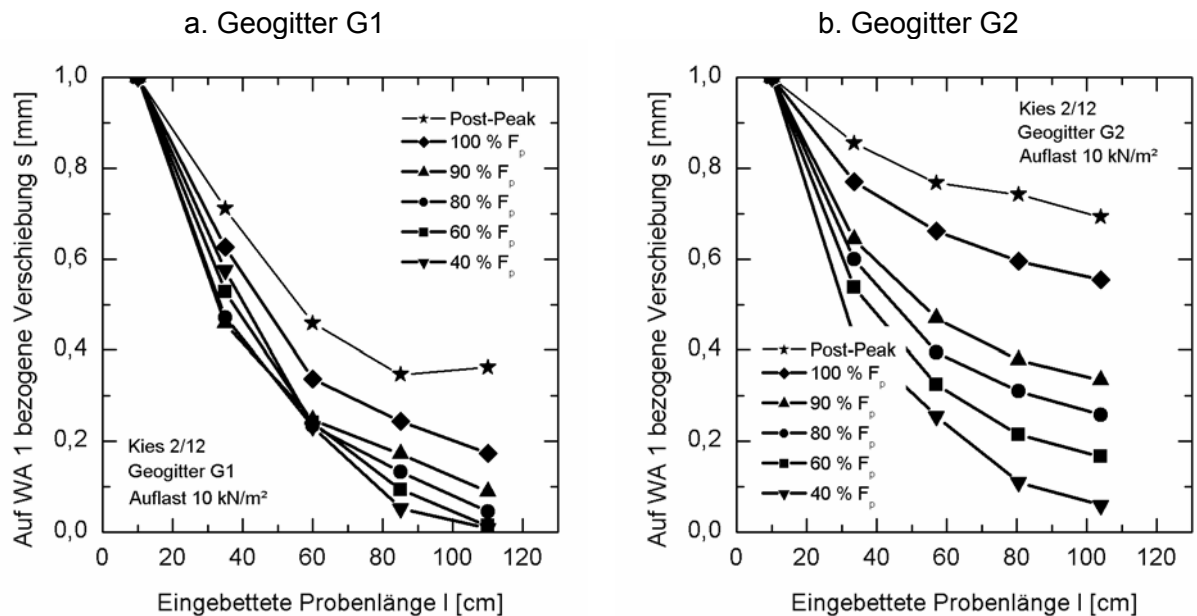


Bild D.5: Entwicklung des Verschiebungsverhältnisses mit der Einbindelänge in Abhängigkeit der aufgetragenen Horizontalkraft für einen Kies 2/12

D.3 Allgemeingültige Verformungsermittlung statischer Auszugsversuche

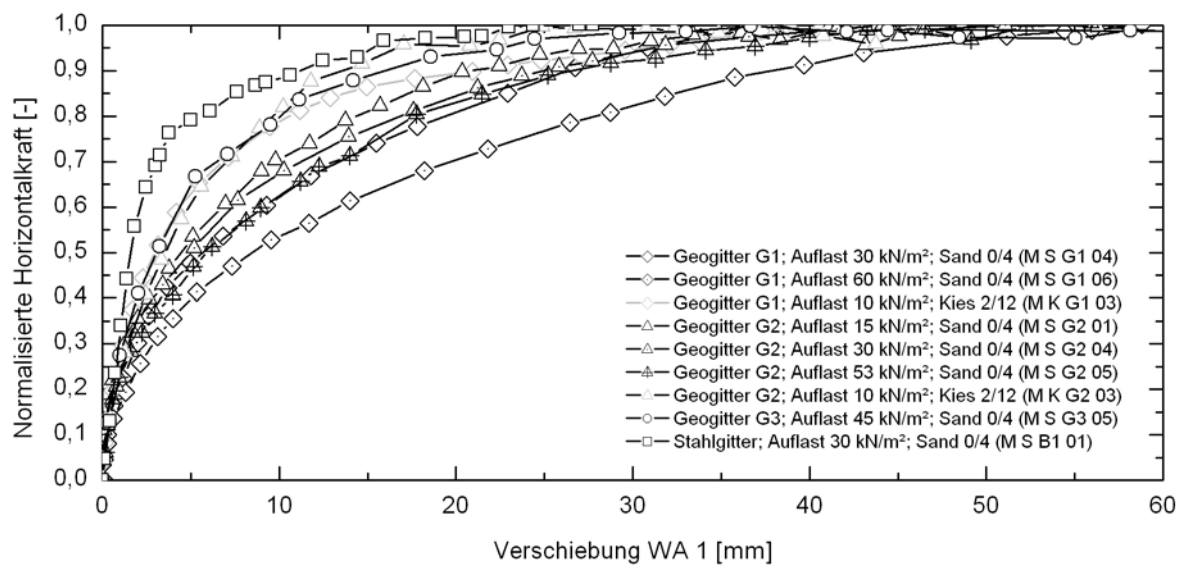


Bild D.6: Normalisierte Entwicklung der Horizontalkraft in Abhängigkeit der Verschiebung für unterschiedliche Bewehrungsmaterialien I

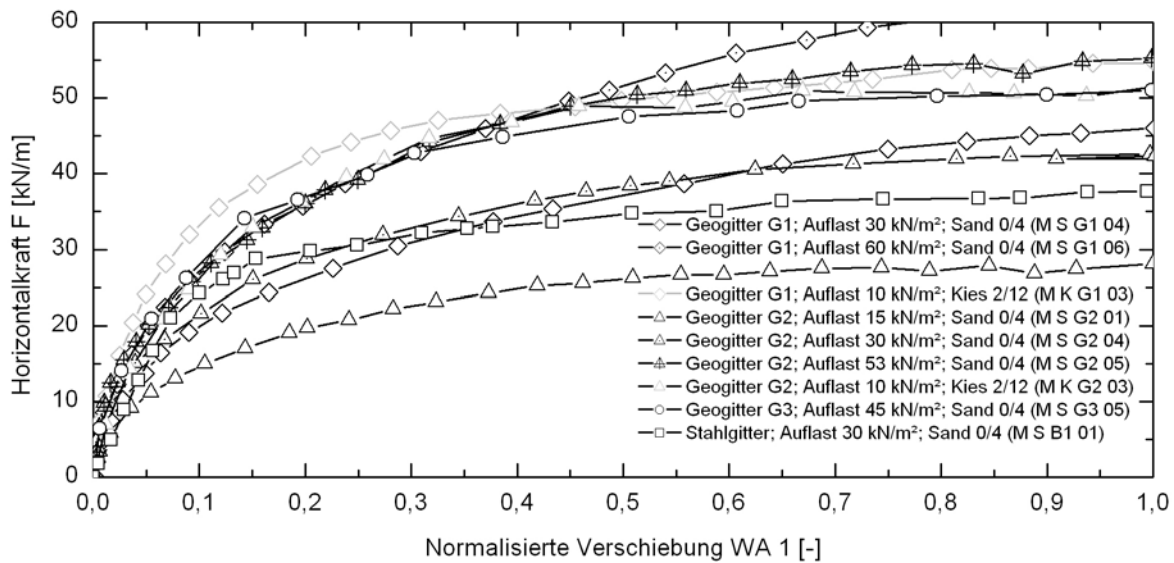


Bild D.7: Normalisierte Entwicklung der Horizontalkraft in Abhängigkeit der Verschiebung für unterschiedliche Bewehrungsmaterialien II

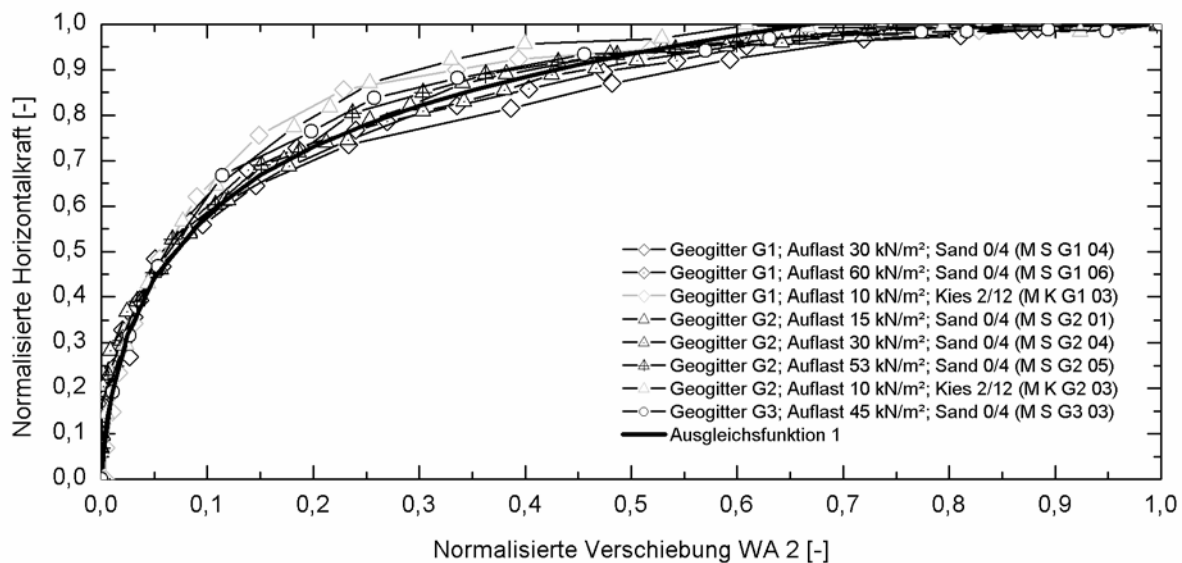


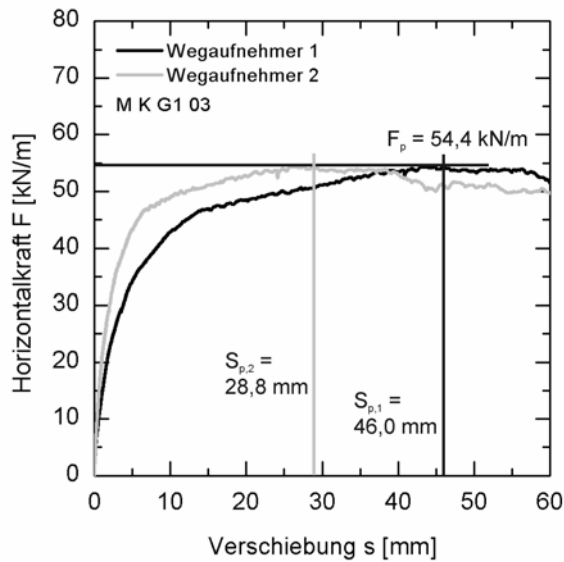
Bild D.8: Normalisierte Entwicklung der Horizontalkraft in Abhängigkeit der Verschiebung für unterschiedliche Bewehrungsmaterialien an Wegaufnehmer 2

Aufgrund des geringeren Einflusses der Steifigkeitsverhältnisse an der zweiten instrumentierten Querstrebe ist ein gleichmäßigeres Verhalten der Materialien zu beobachten.

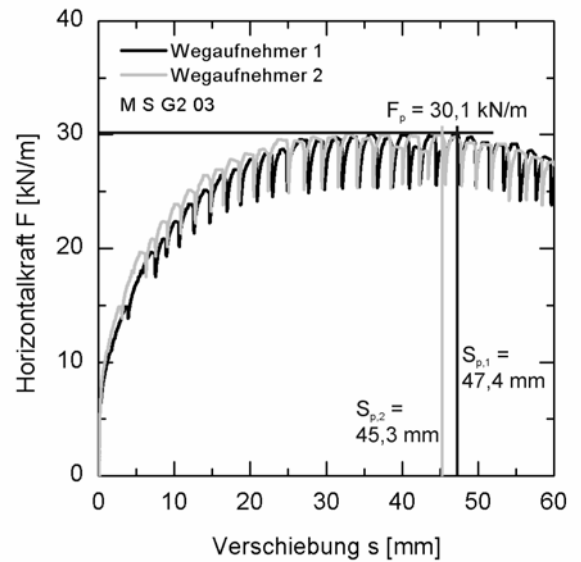
Unter Berücksichtigung von $s_{p,2}$ kann für alle untersuchten Materialien die in Kap. 4.8 beschriebene Ausgleichsfunktion 1 verwendet werden.

D.4 Statische Referenzversuche

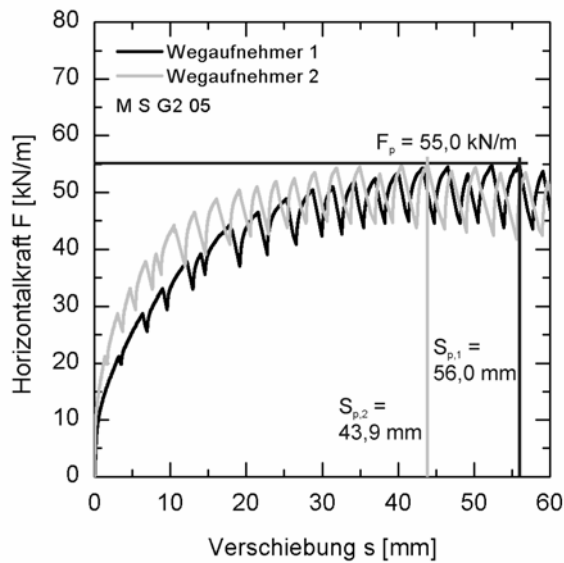
a. Geogitter G1; Kies 2/12 (M K G1 03)



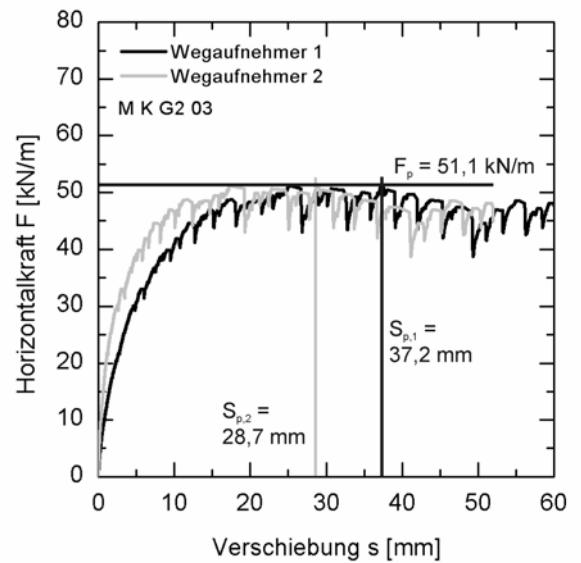
b. Geogitter G2; Sand 0/4 (M S G2 03)



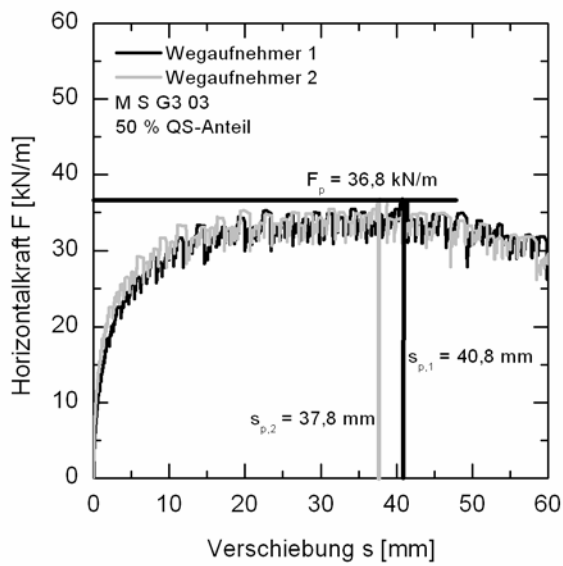
c. Geogitter G2; Sand 0/4 (M S G2 05)



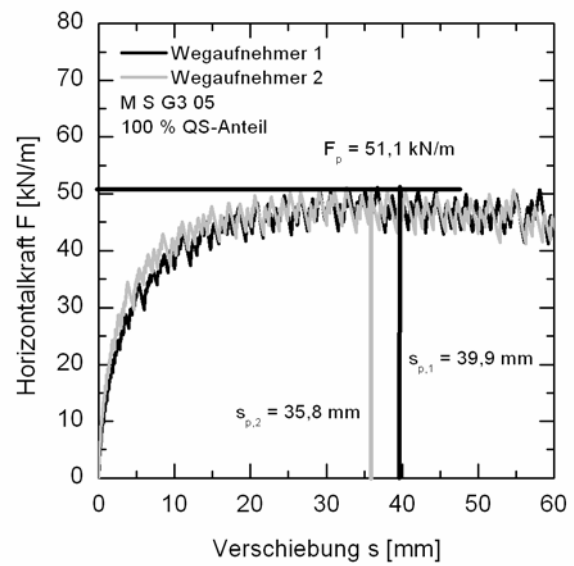
d. Geogitter G2; Kies 2/12 (M K G2 03)



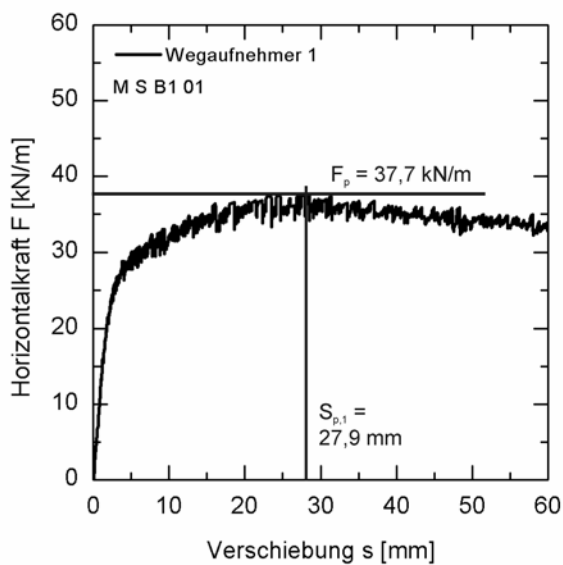
e. Geogitter G3, Sand 0/4 (M S G3 03)



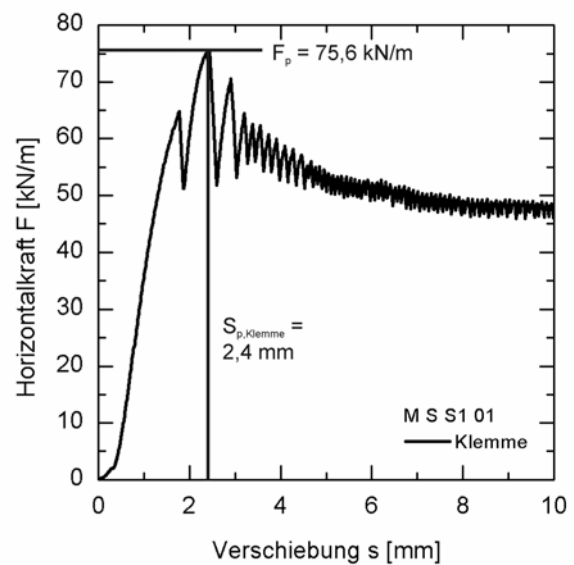
f. Geogitter G3, Sand 0/4 (M S G3 05)



g. Stahlgitter (M S B1 01)



h. Stahlblech (M S S1 01)

**Bild D.9:** Zusammenstellung statischer Referenzversuche

E Auswertung der zyklischen Modellversuche

E.1 Ablauf der Datenaufbereitung

Zur Auswertung unterschiedlichster Parameter werden in einem vierstufigen Datenmodell variable Datendichten ermittelt.

Stufe	Datenbezeichnung	Datendichte	Verwendung der Daten z.B. für
1	Rohdaten	sehr hoch	Analyse einzelner Lastspiele
2	Grenzwertextrahierung	hoch	Bestimmung des Lastniveaus und der Amplitude
3	Mittelwertfilterung	hoch	Erkennung von Inkonsistenzen; Spezielle Daten bei einem Lastspiel
4	Datenkomprimierung	niedrig	Darstellung des allgemeinen Versuchsverhaltens; Vergleich unterschiedlicher Versuche

Im Folgenden werden tabellarisch wichtige Schritte in der Datenaufbereitung der zyklischen Modellversuche aufgelistet und erklärt.

Stufe	Schritt	Formeln/Bezeichnungen	Anmerkungen
1	Aufzeichnung der Rohdaten		Aufzeichnungsfrequenz = 5 x Belastungsfrequenz → Datenmenge bleibt handhabbar bei größtmöglicher Datenqualität
2a	Extrahierung von Minima und Maxima	$F_{u,n}$: Minimum der Horizontalkraft bei Lastspiel n $F_{o,n}$: Maximum der Horizontalkraft bei Lastspiel n s_{i,n,F_o} : Verschiebung an WA i zum Zeitpunkt $F_{o,n}$ s_{i,n,F_u} : Verschiebung an WA i zum Zeitpunkt $F_{u,n}$	Durch ein Makro werden die Minima und Maxima der Horizontalkraft und die zugehörigen Verschiebungen für jedes Lastspiel ermittelt. Datenkomprimierung.
2b	Ermittlung von F_o , F_u und A	$F_o = \frac{\sum_{n=1}^N F_{o,n}}{N}; F_u = \frac{\sum_{n=1}^N F_{u,n}}{N}; A = F_o - F_u$ <p>N: Gesamtzahl der aufgetragenen Lastspiele</p>	Mittelwertbildung der gemessenen minimalen und maximalen Horizontalkräfte pro Lastspiel ergibt die exakten Kraftdaten des zyklischen Modellversuches.

Stufe	Schritt	Formeln/Bezeichnungen	Anmerkungen
2c	Verschiebungsermittlung am Maximum	$s_{i,n} = s_{i,n,Fo}$	Für weitere Untersuchungen werden auf der sicheren Seite die größeren Verschiebungen am Kraftmaximum verwendet.
3a	Mittelwertfilterung der Verschiebungen	$s_{i,n} = \frac{\sum_{n-10}^{n+10} s_{i,n}}{20}$	Mittelwertbildung über 20 Werte zur Verbesserung der Datenqualität durch Vergleichmäßigung von kleineren Messwertschwankungen aufgrund sehr geringer Veränderung der Absolutwerte. Grundlage bildet $s_{i,n}$ aus Schritt 2c.
3b	Mittelwertfilterung der Verschiebungsinkremente	$\Delta s_{i,n} = \frac{s_{i,n+5} - s_{i,n-5}}{10}$	Weitere Mittelwertbildung über 10 Werte zur Verbesserung der Datenqualität durch Vergleichmäßigung von kleineren Messwertschwankungen aufgrund sehr geringer Veränderung der Absolutwerte. Grundlage bildet $s_{i,n}$ aus Schritt 3a.
3c	Mittelwertfilterung der Dehnungen	$\varepsilon_{i/i+1,n} = s_{i,n} - s_{i+1,n}$	Ermittlung der Dehnungen in den einzelnen Materialabschnitten aus der Mittelwertbildung der Verschiebungen. Grundlage bildet $s_{i,n}$ aus Schritt 3a.
3d	Mittelwertfilterung der Dehnungsänderungen	$\Delta \varepsilon_{i/i+1,n} = \frac{\varepsilon_{i/i+1,n+5} - \varepsilon_{i/i+1,n-5}}{10}$	Ermittlung der Änderung der Dehnung über einen Zeitraum von 10 Lastspielen. Grundlage bildet $\varepsilon_{i/i+1}$ aus Schritt 3c.
4a	Datenkomprimierung durch Mittelwertfilterung und Wertereduzierung (Verschiebungen)	$s_{i,n} = \frac{\sum_{n-25}^{n+25} s_{i,n}}{50} \text{ für } n = 50, 100, 150, 200$ $s_{i,n} = \frac{\sum_{n-50}^{n+50} s_{i,n}}{100} \text{ für } n = 300, 400, \dots, 900$ $s_{i,n} = \frac{\sum_{n-500}^{n+500} s_{i,n}}{1000} \text{ für } n = 1000, \dots, 10.000$	Mittelwertbildung über 50, 100 bzw. 1000 Werte in Abhängigkeit der Relevanz der Datenänderung. Erhebliche Reduzierung der Datendichte bei geringfügigem Verlust an Datenqualität. Grundlage bildet $s_{i,n}$ aus Schritt 3a.

Stufe	Schritt	Formeln/Bezeichnungen	Anmerkungen
4b	Datenkomprimierung durch Mittelwertfilterung und Wertereduzierung (Verschiebungsinkremente)	$\Delta s_{i,n} = \frac{\sum_{n-25}^{n+25} \Delta s_{i,n}}{50} \quad \text{für } n = 50, 100, 150, 200$ $\Delta s_{i,n} = \frac{\sum_{n-50}^{n+50} \Delta s_{i,n}}{100} \quad \text{für } n = 300, 400, \dots, 900$ $\Delta s_{i,n} = \frac{\sum_{n-500}^{n+500} \Delta s_{i,n}}{1000} \quad \text{für } n = 1000, \dots, 10.000$	Mittelwertbildung über 50, 100 bzw. 1000 Werte in Abhängigkeit der Relevanz der Datenänderung. Erhebliche Reduzierung der Datendichte bei geringfügigem Verlust an Datenqualität. Grundlage bildet $\Delta s_{i,n}$ aus Schritt 3b.
4c	Datenkomprimierung durch Mittelwertfilterung und Wertereduzierung (Dehnungen)	$\varepsilon_{i/i+1,n} = s_{i,n} - s_{i+1,n}$	Dehnungsermittlung aus den bereits komprimierten Verschiebungsdaten (Schritt 4a). Grundlage bildet $s_{i,n}$ aus Schritt 4a.
4d	Datenkomprimierung durch Mittelwertfilterung und Wertereduzierung (Dehnungsänderungen)	$\Delta \varepsilon_{i/i+1,n} = \frac{\varepsilon_{i/i+1,n+25} - \varepsilon_{i/i+1,n-25}}{50}$ <p>für $n = 50, 100, 150, 200$</p> $\Delta \varepsilon_{i/i+1,n} = \frac{\varepsilon_{i/i+1,n+50} - \varepsilon_{i/i+1,n-50}}{100}$ <p>für $n = 300, 400, \dots, 900$</p> $\Delta \varepsilon_{i/i+1,n} = \frac{\varepsilon_{i/i+1,n+500} - \varepsilon_{i/i+1,n-500}}{1000}$ <p>für $n = 1000, \dots, 10.000$</p>	Mittelwertbildung über 50, 100 bzw. 1000 Werte in Abhängigkeit der Relevanz der Datenänderung. Erhebliche Reduzierung der Datendichte bei geringfügigem Verlust an Datenqualität. Grundlage bildet $\Delta s_{i,n}$ aus Schritt 3d.

Stufe	Schritt	Formeln/Bezeichnungen	Anmerkungen
4e	Verschiebungsentwicklung im Vergleich zu ersten instrumentierten Querstrebe	$\frac{s_{i,n+25} - s_{i,n-25}}{s_{1,n+25} - s_{1,n-25}} \quad i > 1; n = 75, 125, 175$ $\frac{s_{i,n+50} - s_{i,n-50}}{s_{1,n+50} - s_{1,n-50}} \quad i > 1; n = 250, 350, \dots, 950$ $\frac{s_{i,n+500} - s_{i,n-500}}{s_{1,n+500} - s_{1,n-500}} \quad i > 1; n = 1500, \dots, 9500$	Grundlage bildet $s_{i,n}$ aus Schritt 4a.

E.2 Lastabtragung

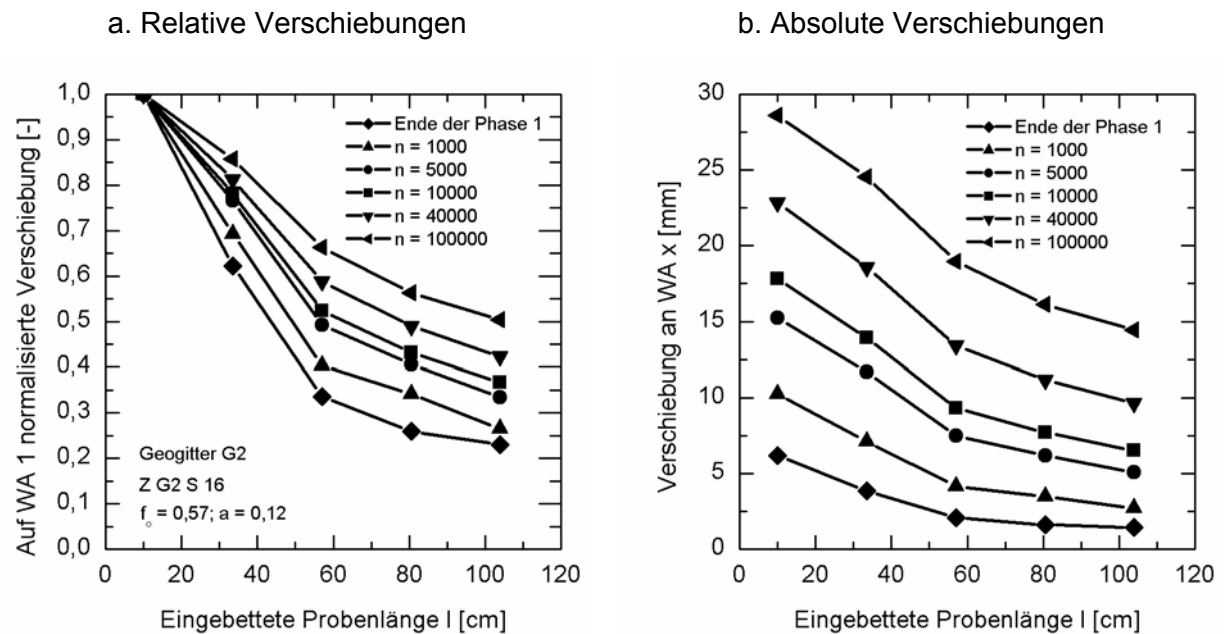


Bild E.1: Verschiebungen des WA 1 bei einem Geogitter G2 in Sand 0/4 in Abhängigkeit der Lastspielzahl

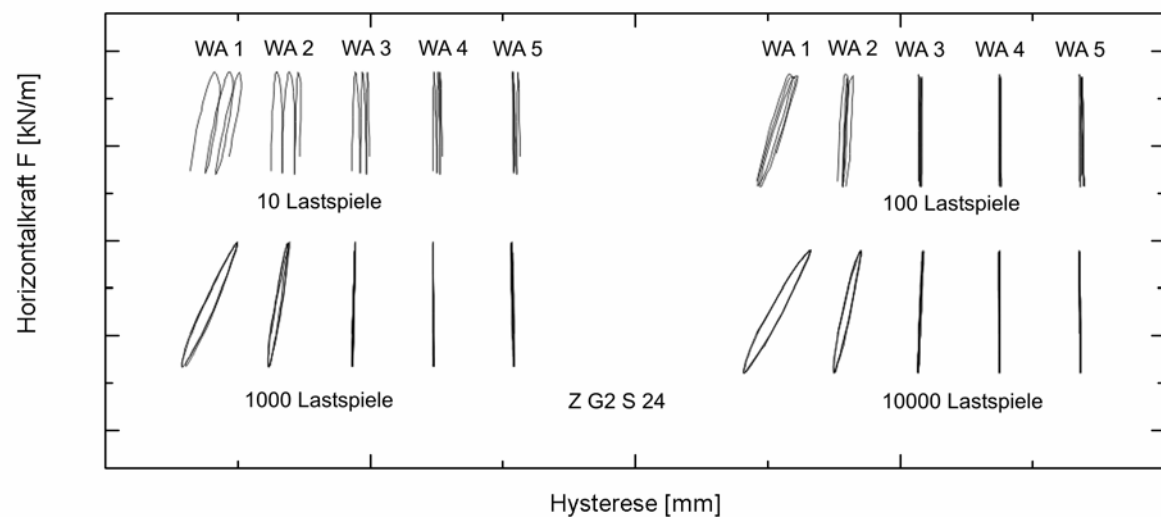


Bild E.2: Hysteresen an fünf eingebetteten Verschiebungsmessstellen in Abhängigkeit der Lastspielzahl bei Geogitter G2

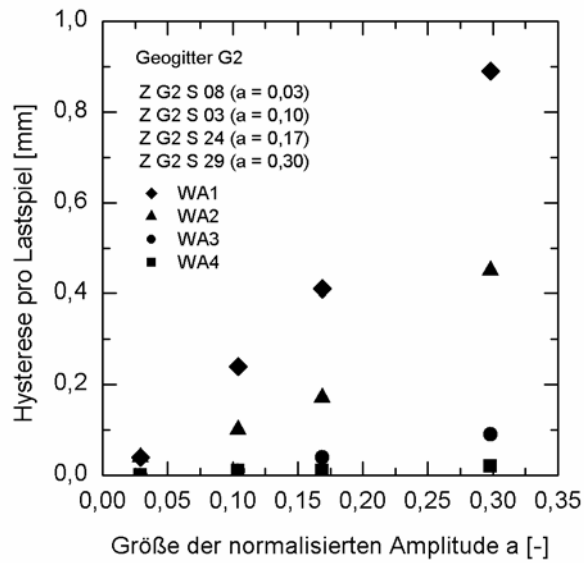


Bild E.3: Einfluss der Amplitude auf die Größe der Hysterese am Beispiel des Geogitters G2

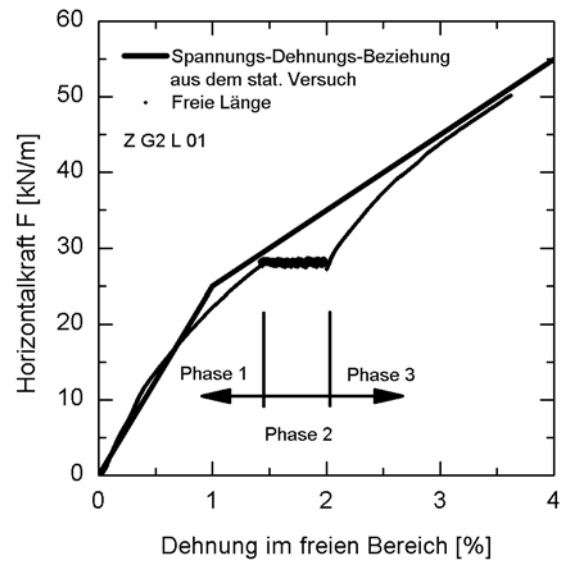


Bild E.4: Spannungs-Dehnungs-Beziehung in der freien Länge des zyklischen im Vergleich zum statischen Modellversuch

E.3 Entwicklung der Kriechbeziehungen

$$\xi(n) = \frac{\xi(n = 10^4) - 1}{\log 10^4} \cdot n + 1$$

$$\varepsilon(n) = \varepsilon(n = 1) \cdot \xi(n)$$

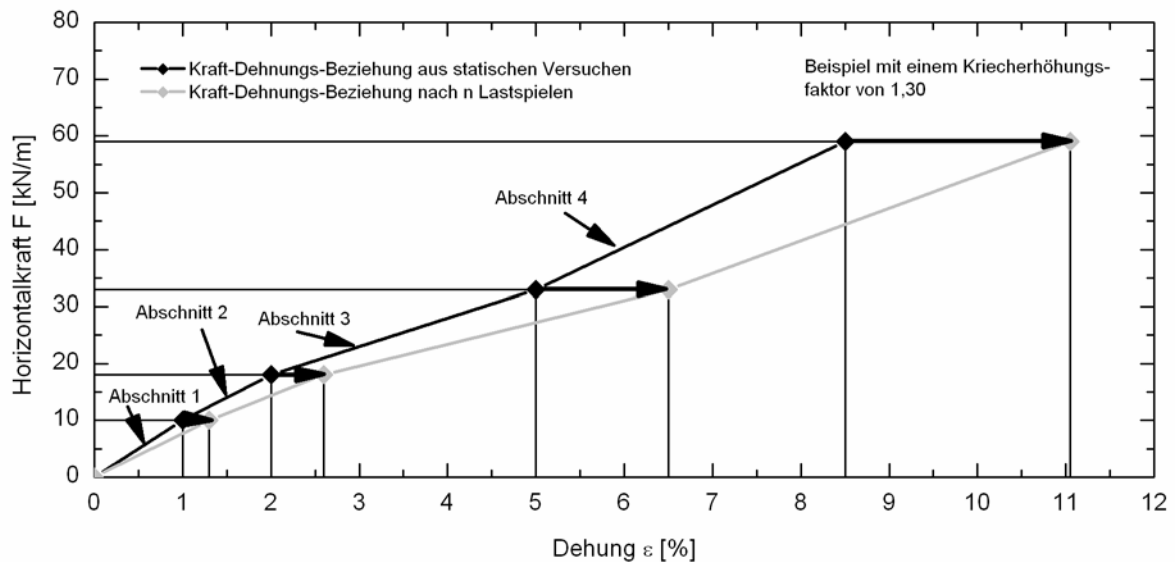


Bild E.5: Entwicklung der Kriechbeziehungen in unterschiedlichen Abschnitten der eingebetteten Probe

Darstellung am Beispiel von Geogitter G1:

Abschnitt 1 ($0 \leq \varepsilon \leq \xi(n) \cdot 1$):

$$F = \varepsilon \cdot \frac{10}{\xi(n) \cdot 1}; \text{ Steigung der } \sigma\text{-}\varepsilon\text{-Beziehung: } \frac{10}{\xi(n) \cdot 1}$$

Abschnitt 2 ($\xi(n) \cdot 1 < \varepsilon \leq \xi(n) \cdot 2$):

$$F = 10 + (\varepsilon - \xi(n)) \cdot \frac{8}{\xi(n)}; \text{ Steigung der } \sigma\text{-}\varepsilon\text{-Beziehung: } \frac{8}{\xi(n)}$$

Abschnitt 3 ($\xi(n) \cdot 2 < \varepsilon \leq \xi(n) \cdot 5$):

$$F = 18 + (\varepsilon - 2 \cdot \xi(n)) \cdot \frac{5}{\xi(n)}; \text{ Steigung der } \sigma\text{-}\varepsilon\text{-Beziehung: } \frac{5}{\xi(n)}$$

Abschnitt 4 ($\xi(n) \cdot 5 < \varepsilon \leq \xi(n) \cdot 8,5$):

$$F = 33 + (\varepsilon - 5 \cdot \xi(n)) \cdot \frac{26}{3,5 \cdot \xi(n)}; \text{ Steigung der } \sigma\text{-}\varepsilon\text{-Beziehung: } \frac{26}{3,5 \cdot \xi(n)}$$

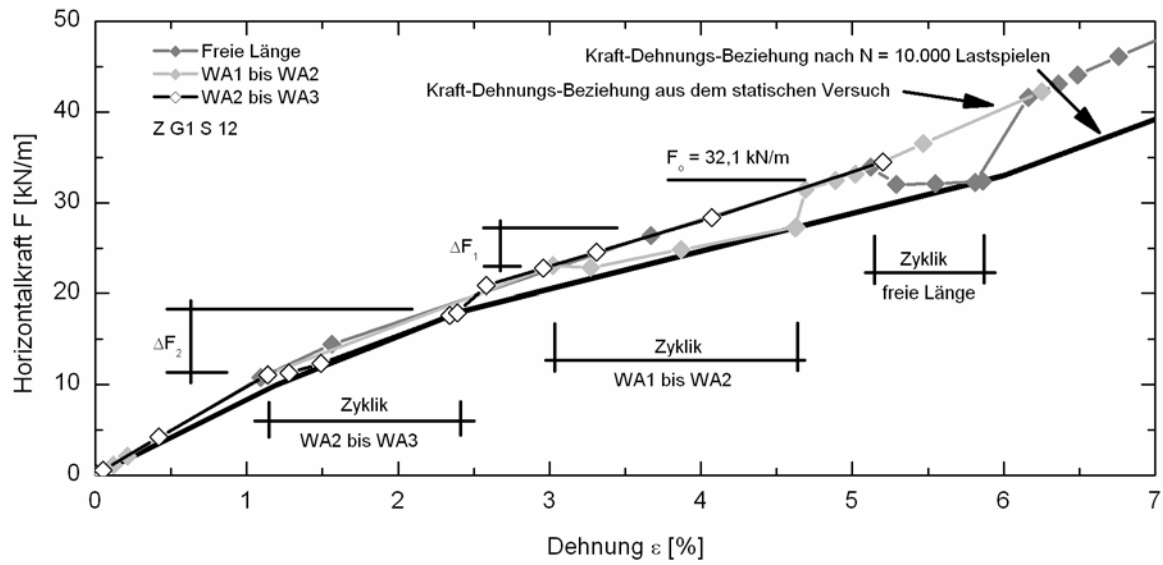
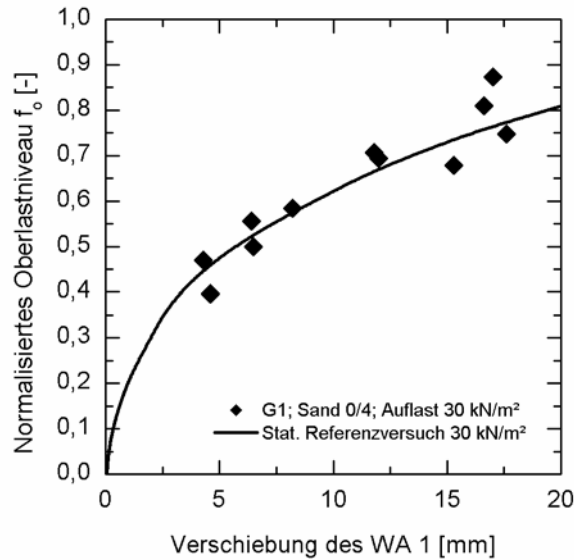


Bild E.6: Entwicklung der Kraft-Dehnungs-Beziehung in einem zyklischen Modellversuch

F Allgemeingültige Auswertemethodik

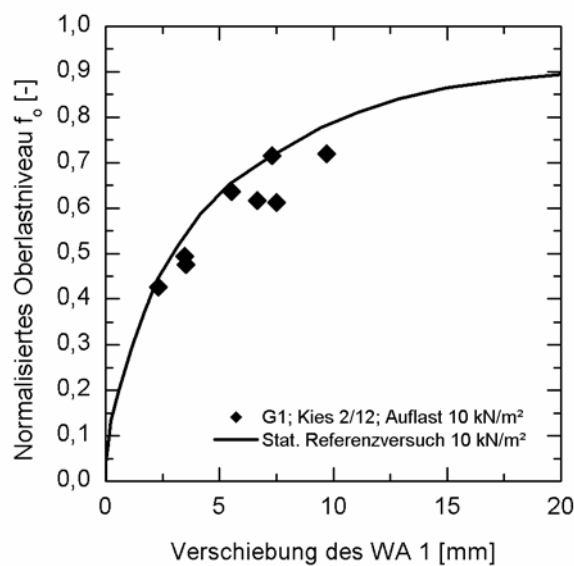
F.1 Statische Verschiebungen der Phase 1



a. Geogitter G1

Bild F.1:

Überprüfung der zyklischen Modellversuche am statischen Referenzversuch (Geogitter G1 im Sand 0/4)



b. Geogitter G2

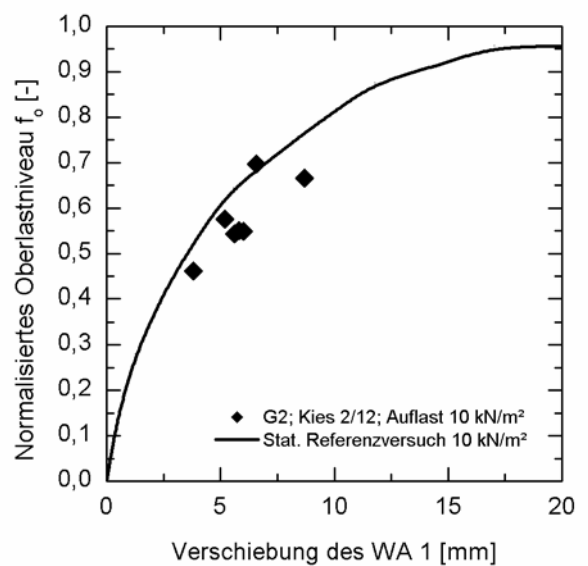
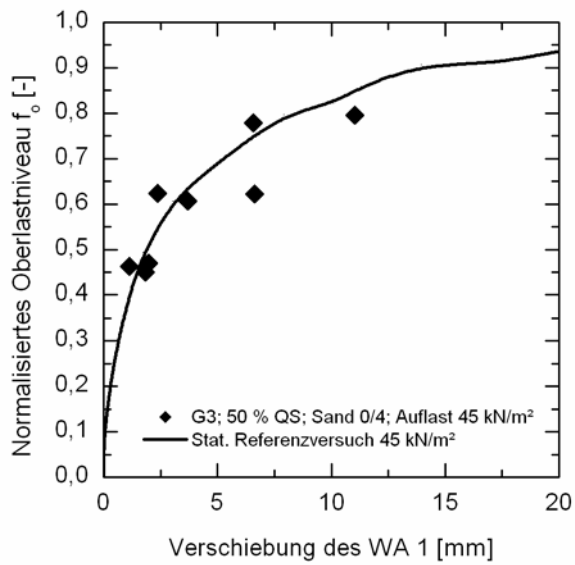


Bild F.2: Überprüfung der zyklischen Modellversuche am statischen Referenzversuch in Kies 2/12

a. Geogitter G3; 50 % Querstrebenanteil



b. Geogitter G3; 50 % Querstrebenanteil

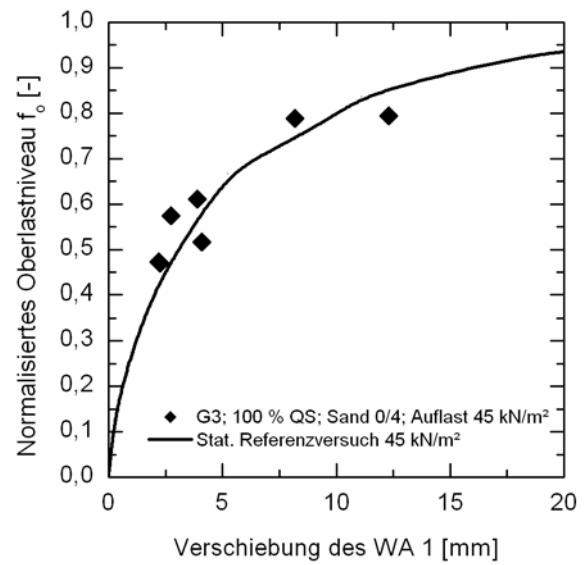


Bild F.3: Überprüfung der zyklischen Modellversuche am statischen Referenzversuch in Sand 0/4

F.2 Ablauf der Regressionsanalyse bei der Verformungsermittlung

Ansatz: m = 0

$$f(x,y) = \beta_1 \cdot e^{\beta_2 \cdot x + \beta_3 \cdot y}$$

Ansatzfunktion

$$f(x_i, y_i) = z_i \quad \begin{aligned} x_i &= \frac{F_o}{F_p} \\ y_i &= \frac{A}{F_p} \\ z_i &= s_{\text{zykl}} > 0 \end{aligned}$$

Wertefunktion

$$\begin{aligned} \ln(\beta_1 \cdot e^{\beta_2 \cdot x + \beta_3 \cdot y}) &= \ln z_i \\ \ln(\beta_1) + \beta_2 \cdot x + \beta_3 \cdot y &= \ln z_i \end{aligned}$$

Linearisieren der Gleichung

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n \end{pmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} \ln(\beta_1) \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix}}_{\vec{b}} = \underbrace{\begin{pmatrix} \ln(z_1) \\ \ln(z_2) \\ \ln(z_3) \\ \vdots \\ \ln(z_n) \end{pmatrix}}_{\vec{z}}$$

Matrizenschreibweise des Gleichungssystems

$$A^T \cdot A \cdot \vec{b} = A^T \vec{z}$$

Rechenvorschrift zur „Methode der kleinsten Quadrate“

$$\Rightarrow (\ln(\beta_1), \beta_2, \beta_3)$$

Ermittelte Regressionskoeffizienten

Ansatz: $m = \beta_4 \cdot x \cdot f_o \cdot x \cdot a$

$$f(x, y) = \beta_1 \cdot e^{\beta_2 \cdot x + \beta_3 \cdot y + \beta_4 \cdot x \cdot y}$$

Ansatzfunktion

$$\begin{aligned} x_i &= \frac{F_o}{F_p} \\ f(x_i, y_i) &= z_i \quad y_i = \frac{A}{F_p} \\ z_i &= s_{\text{zykl}} > 0 \end{aligned}$$

Wertefunktion

$$\begin{aligned} \ln(\beta_1 \cdot e^{\beta_2 \cdot x + \beta_3 \cdot y + \beta_4 \cdot x \cdot y}) &= \ln z_i \\ \ln(\beta_1) + \beta_2 \cdot x + \beta_3 \cdot y + \beta_4 \cdot x \cdot y &= \ln z_i \end{aligned}$$

Linearisieren der Gleichung

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n \end{pmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} \ln(\beta_1) \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{pmatrix}}_{\vec{b}} = \underbrace{\begin{pmatrix} \ln(z_1) \\ \ln(z_2) \\ \ln(z_3) \\ \vdots \\ \ln(z_n) \end{pmatrix}}_{\vec{z}}$$

Matrizenschreibweise des
Gleichungssystems

$$A^T \cdot A \cdot \vec{b} = A^T \vec{z}$$

Rechenvorschrift zur „Methode der
kleinsten Quadrate“

$$\Rightarrow (\ln(\beta_1), \beta_2, \beta_3, \beta_4)$$

Ermittelte Regressionskoeffizienten

F.3 Zusammenstellung der Regressionsdaten für die Verformungsermittlung

Ansatzfunktion 1: $m = 0 \rightarrow s_{zykl} = \beta_1 \cdot e^{\beta_2 \cdot f_o + \beta_3 \cdot a}$

Ansatzfunktion 2: $m = \beta_4 \times f_o \times a \rightarrow s_{zykl} = \beta_1 \cdot e^{\beta_2 \cdot f_o + \beta_3 \cdot a + \beta_4 \cdot f_o \cdot a}$

mit: $f_o = F_o/F_p$

$a = A/F_p$

β_i = Regressionskoeffizienten

		Geokunststoff						
			Geogitter G1		Geogitter G2		Geogitter G3	
			WA1	WA2	WA1	WA2	WA1	WA2
Anzahl der Lastspiele/Art des Erdstoffes	100 (Sand 0/4)	Fkt.	1	1	2	2		
		β_1	0,59	0,24	1,48	0,83		
		β_2	0,90	1,17	-1,67	-1,52		
		β_3	7,04	8,41	-1,50	-0,88		
		β_4			20,16	22,66		
	1.000 (Sand 0/4)	Fkt.	1	1	2	2		
		β_1	2,28	0,77	1,07	0,54		
		β_2	0,90	1,43	0,64	0,60		
		β_3	4,23	6,46	1,57	4,11		
		β_4			14,58	16,25		
	10.000 (Sand 0/4)	Fkt.	1	1	2	2	1	1
		β_1	1,28	0,35	1,05	0,47	0,25	0,16
		β_2	3,15	4,21	2,14	2,68	3,98	4,27
		β_3	3,51	5,76	-2,45	0,36	5,79	6,84
		β_4			24,53	24,89		
	10.000 (Kies 2/12)	Fkt.	1		2			
		β_1	1,24		0,08			
		β_2	1,59		4,98			
		β_3	13,31		9,57			
		β_4			18,42			
	100.000 (Sand 0/4)	Fkt.			2			
		β_1			4,25			
		β_2			0,78			
		β_3			-13,20			
		β_4			44,51			

F.4 Überprüfung der Ergebnisqualität der Regression

		Geokunststoff					
		Geogitter G1 (Ansatzfunktion 1)		Geogitter G2 (Ansatzfunktion 2)		Geogitter G3 (Ansatzfunktion 1)	
		WA1	WA2	WA1	WA2	WA1	WA2
Anzahl der Lastspiele/Art des Erdstoffes	100 (Sand 0/4)	0,88	0,77	0,73	0,65	--	--
		22,3	37,9	38,0	47,7		
		0,6	0,6	0,7	0,8		
	1.000 (Sand 0/4)	0,73	0,73	0,78	0,59	--	--
		19,0	31,5	26,9	39,9		
		1,3	1,4	1,3	1,5		
	10.000 (Sand 0/4)	0,78	0,84	0,82	0,76	0,42	0,41
		18,5	26,4	22,0	29,0	29,1	32,3
		3,0	3,0	2,3	2,5	2,8	2,9
	10.000 (Kies 2/12)	-	--	0,99	--		
		63,3		2,1			
		12,5		0,4			
	100.000 (Sand 0/4)	X	X	0,72	Prüfung nur mit WA 1	X	X
				23,6			
				3,1			

obere Zeile eines Feldes: Bestimmtheitsmaß der Regression

mittlere Zeile eines Feldes: Mittlere Abweichung in %

untere Zeile eines Feldes: Mittlere Abweichung in mm

--: Nicht ermittelt

X: Datenbasis ist für eine Auswertung nicht ausreichend

F.5 Visualisierung der zyklischen Verformungen

Im Folgenden wird eine Übersicht der Visualisierungen der zyklischen Verschiebungen in der Phase 2 des zyklischen Modellversuches vorgestellt.

In die Übersicht sind nur Versuchsreihen mit Sand 0/4 aufgenommen worden, da die Datenbasis für Kies 2/12 für eine allgemeingültige Auswertung nicht ausreichend ist.

		Geokunststoff					
		Geogitter G1 (Ansatzfunktion 1)		Geogitter G2 (Ansatzfunktion 2)		Geogitter G3 (Ansatzfunktion 1)	
		WA1	WA2	WA1	WA2	WA1	WA2
Anzahl der Lastspiele/Art des Erdstoffes	100 (Sand 0/4)	A	--	T	--	--	--
	1.000 (Sand 0/4)	A	--	A	--	--	--
	10.000 (Sand 0/4)	T	A	T	T	--	--
	10.000 (Kies 2/12)	--	--	T	--		
	100.000 (Sand 0/4)	X	X	T (Abs. 6.6.4)	Prüfung nur mit WA 1	X	X

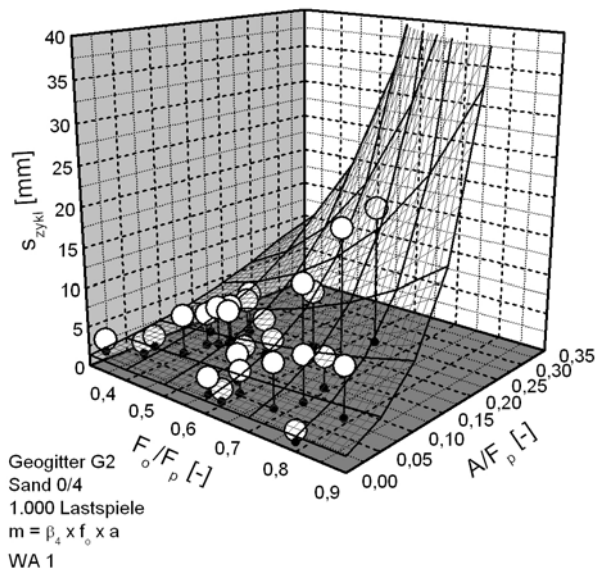
T: Auswertung wird im Text vorgestellt

A: Auswertung ist dem Anhang zu entnehmen

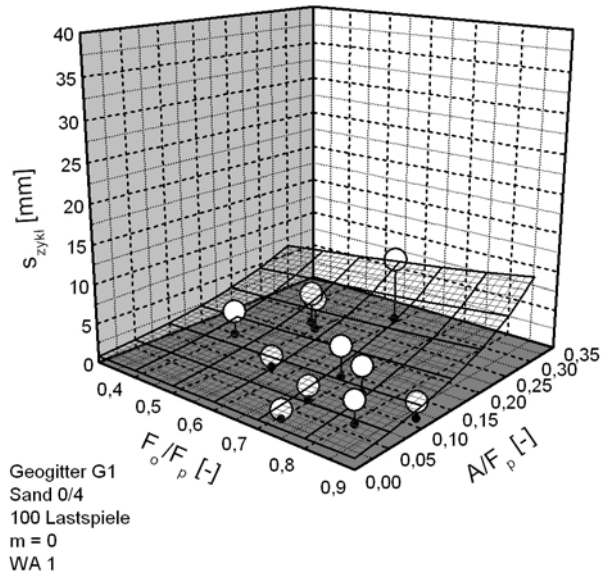
--: Nicht dargestellt

X: Datenbasis ist für eine Auswertung nicht ausreichend

a. Geogitter G2; Sand 0/4; 1.000 Lastspiele



b. Geogitter G1; Sand 0/4; 100 Lastspiele



c. Geogitter G1; Sand 0/4; 1.000 Lastspiele

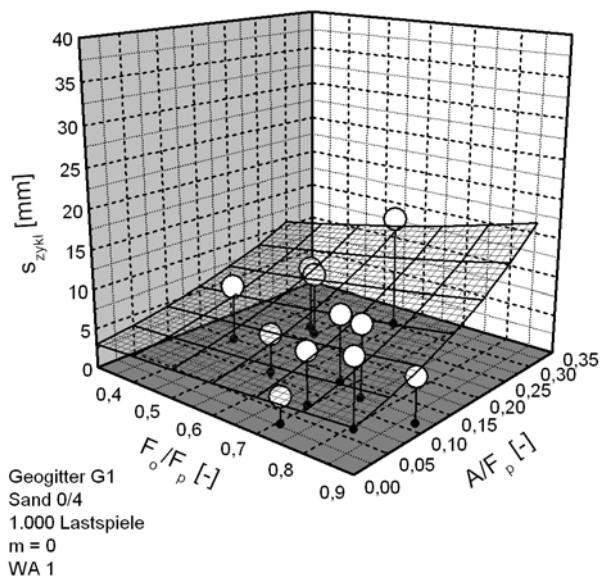
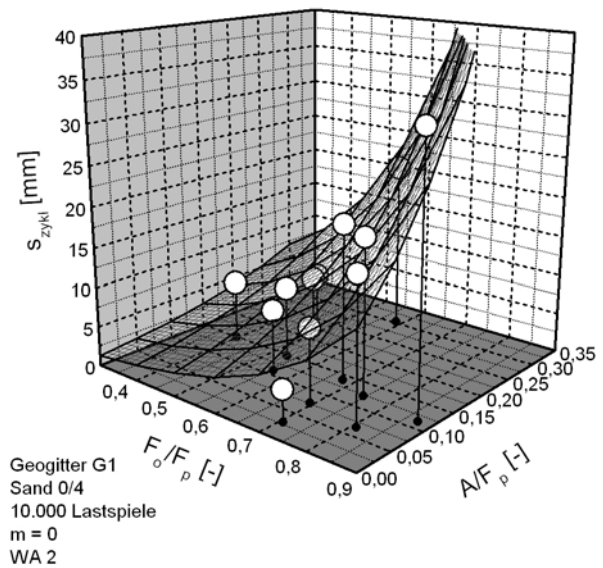
d. Geogitter G1; Sand 0/4; 10.000 Lastspiele;
WA2

Bild F.4: Darstellung der zyklischen Verschiebungen in Abhängigkeit des Oberlastniveaus und der Amplitude

F.6 Ermittlung der Gesamtverschiebungen

Zur Verwendung der folgenden Funktionen ist die Kenntnis der statischen und zyklischen Regressionskoeffizienten α_i und β_i notwendig.

α_i können aus einem statischen Referenzversuch oder unter Verwendung einer Ausgleichsfunktion nach Abschnitt 4.8 ermittelt werden.

β_i können durch eine Regressionsanalyse mehrerer zyklischer Modellversuche oder aus dem Anhang F.3 ermittelt werden.

Die Gesamtverschiebungen nach n Zyklen ermitteln sich für die zyklische Ansatzfunktion 2 mit $m = \beta_4 \times f_0 \times a$ zu:

$$s_{\text{start+zykl}} = \left(e^{\frac{\alpha_1 - f_0}{\alpha_2}} - \alpha_3 \right) \cdot s_p + \beta_1 \cdot e^{\beta_2 \cdot f_0 + \beta_3 \cdot a + \beta_4 \cdot f_0 \cdot a}$$

Die Berechnung der maximalen Amplituden zur Erstellung eines Verschiebungsnogramms bei Verwendung der zyklischen Ansatzfunktion 2 mit $m = \beta_4 \times f_0 \times a$ ergibt sich zu:

$$a = \frac{\ln \left(s_{\text{start+zykl}} - \left(e^{\frac{\alpha_1 - f_0}{\alpha_2}} - \alpha_3 \right) \cdot s_p \right) - \ln \beta_1 - \beta_2 \cdot f_0}{\beta_3 + \beta_4 \cdot f_0}$$

F.7 Visualisierung der Gesamtverschiebungen

Im Folgenden wird eine Übersicht der Visualisierungen der Gesamtverschiebungen der zyklischen Modellversuche vorgestellt.

		Geokunststoff					
		Geogitter G1		Geogitter G2		Geogitter G3	
		WA1	WA2	WA1	WA2	WA1	WA2
Anzahl der Lastspiele/Art des Erdstoffes	100 (Sand 0/4)	A	--	T	--	--	--
	1.000 (Sand 0/4)	--	--	--	--	--	--
	10.000 (Sand 0/4)	T	A	T	A	A	--
	10.000 (Kies 2/12)	A	--	T	--		
	100.000 (Sand 0/4)	(A) Anh. F.8	Prüfung nur mit WA 1	(T) Abs. 6.6.4	Prüfung nur mit WA 1	(A) Anh. F.8	Prüfung nur mit WA 1

T: Auswertung wird im Text vorgestellt

(T): Es wird nur das Versagen ohne Angabe der Verschiebungen dargestellt.

A: Auswertung ist dem Anhang zu entnehmen

(A): Es wird nur das Versagen ohne Angabe der Verschiebungen dargestellt.

--: Nicht dargestellt

X: Datenbasis ist für eine Auswertung nicht ausreichend

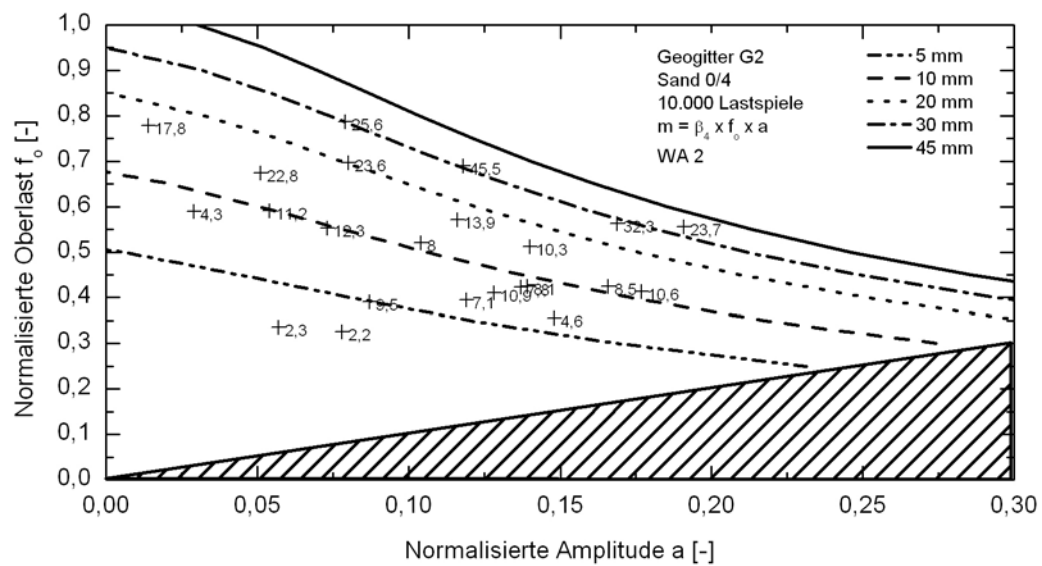


Bild F.5: Verlauf der berechneten zyklischen Verschiebung für Geogitter G2 an WA 2 bei 10.000 Lastspielen im Sand 0/4

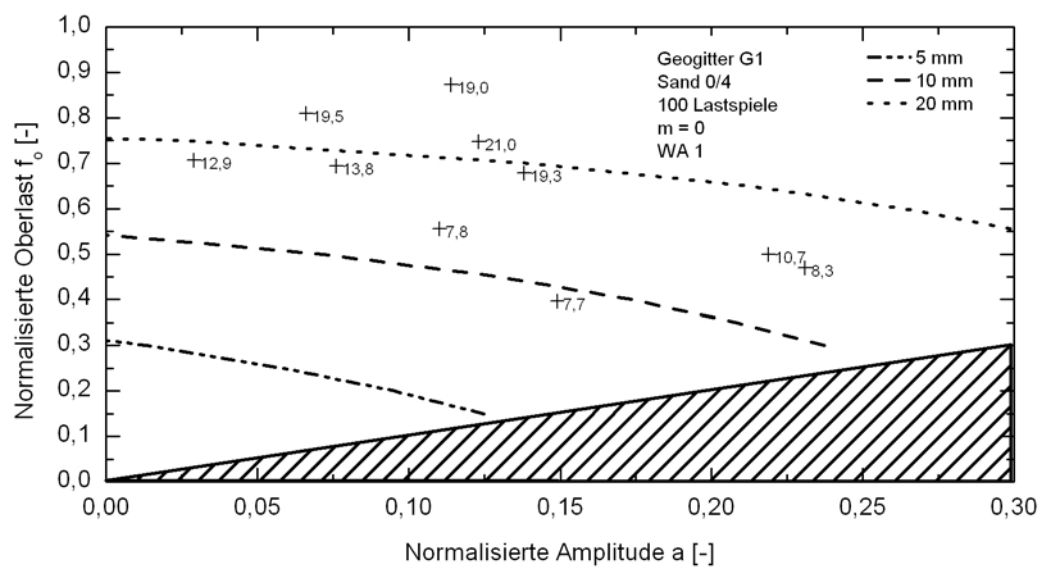


Bild F.6: Verlauf der berechneten zyklischen Verschiebung für Geogitter G1 an WA 1 bei 100 Lastspielen im Sand 0/4

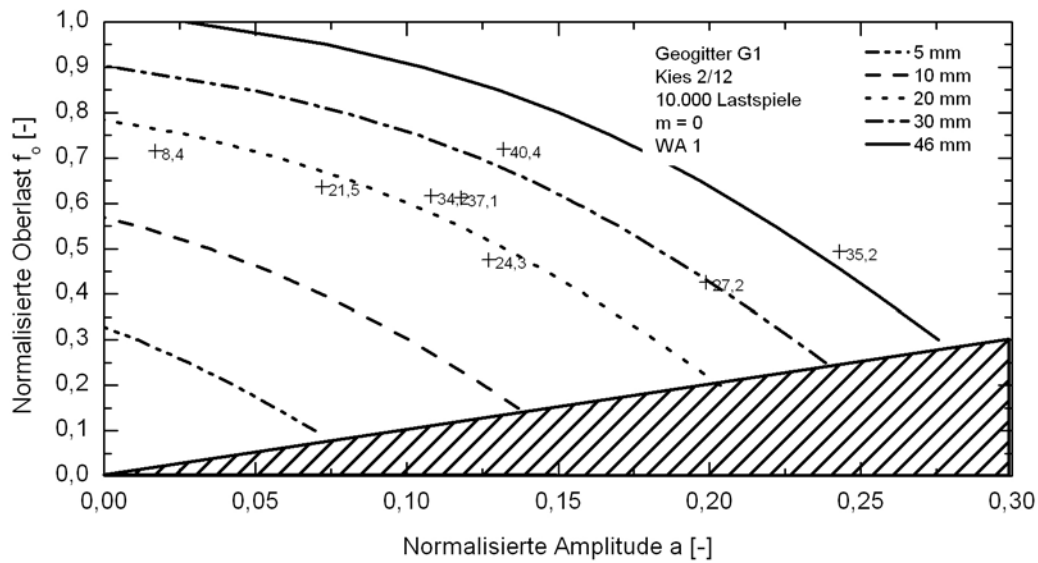


Bild F.7: Verlauf der berechneten zyklischen Verschiebung für Geogitter G1 an WA 1 bei 10.000 Lastspielen im Kies 2/12

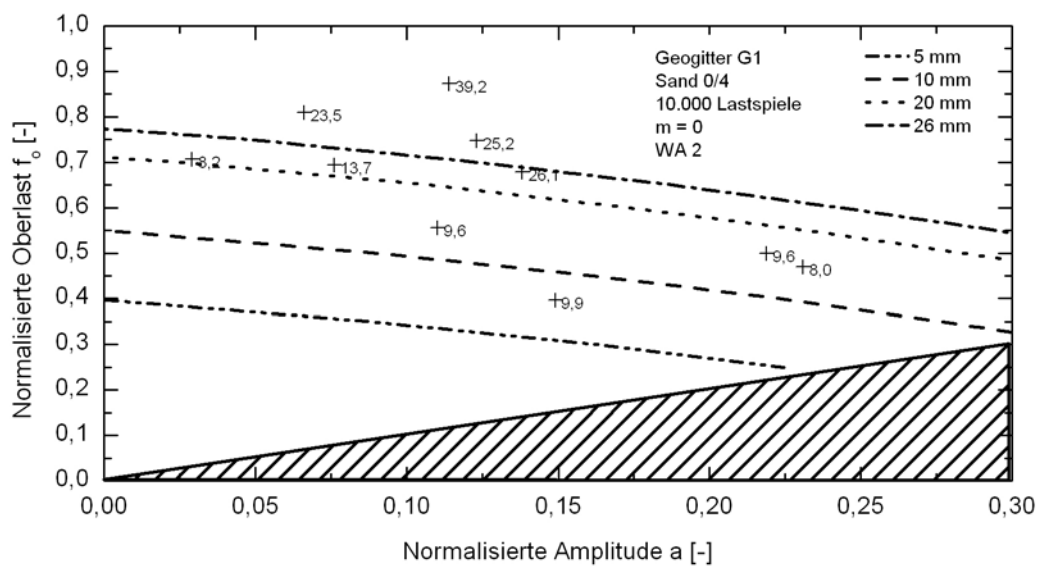


Bild F.8: Verlauf der berechneten zyklischen Verschiebung für Geogitter G1 an WA 2 bei 10.000 Lastspielen im Sand 0/4

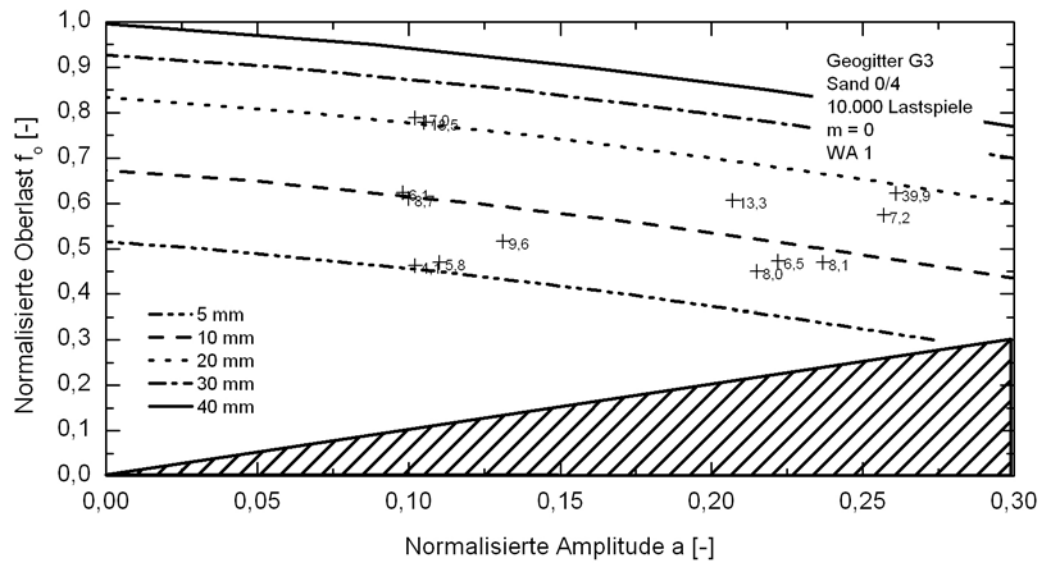


Bild F.9: Verlauf der berechneten zyklischen Verschiebung für Geogitter G3 an WA 1 bei 10.000 Lastspielen im Sand 0/4

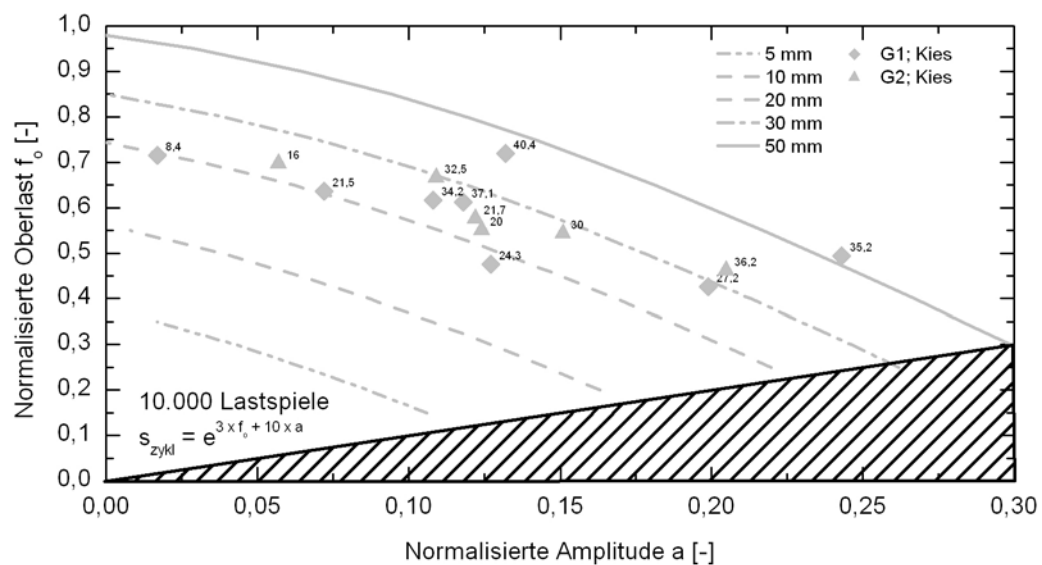


Bild F.10: Abschätzung des Verlaufes der berechneten Gesamtverschiebung für alle untersuchten Geogitter an WA 1 bei 10.000 Lastspielen im Kies 2/12

F.8 Durchführung der Extrapolation

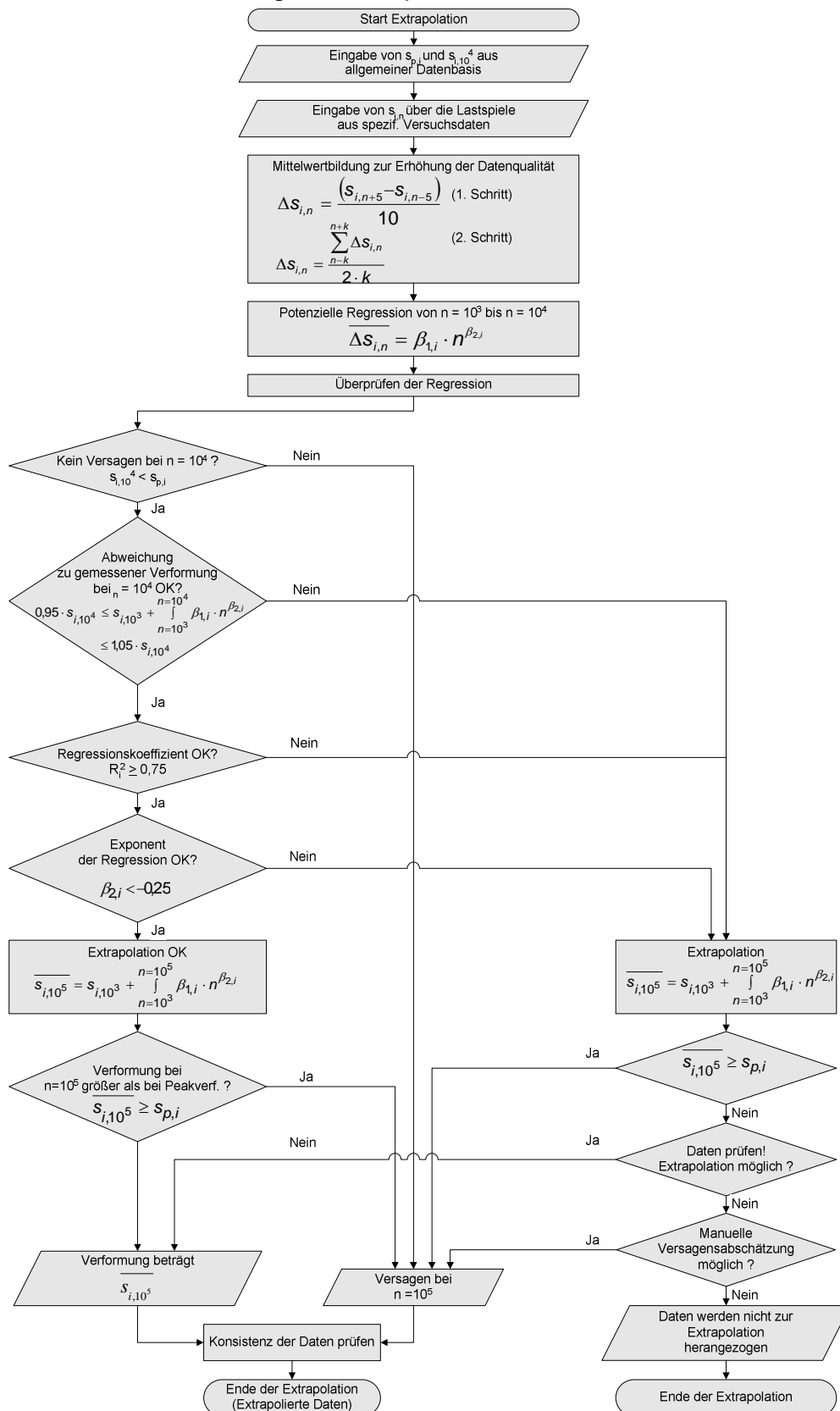


Bild F.11: Ablauf der Extrapolation zur Abschätzung des Versagensverhaltens bei erhöhten Lastspielzahlen

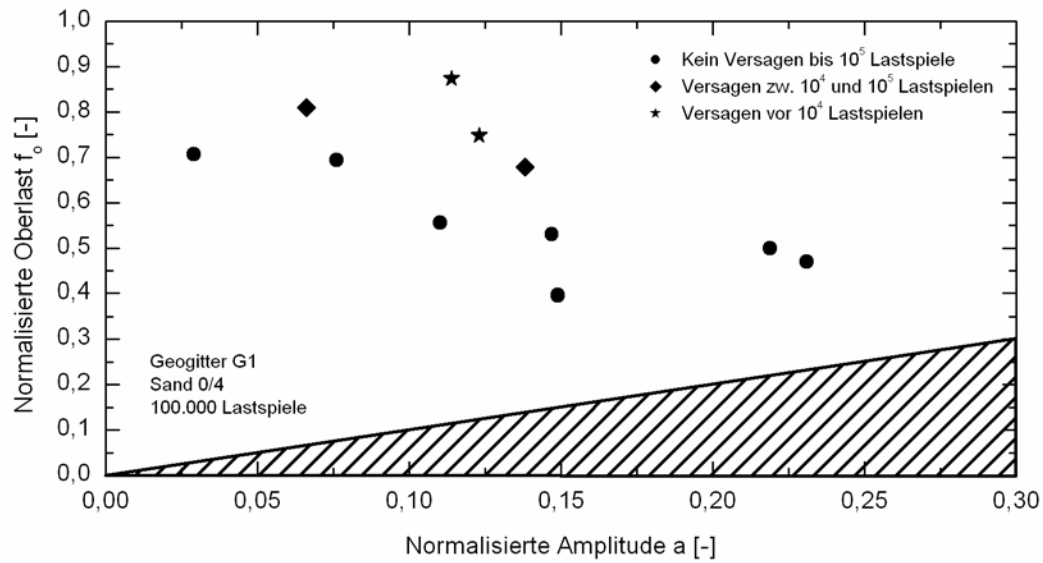


Bild F.12: Extrapoliertes Versagensverhalten zyklischer Modellversuche bei Geogitter G1

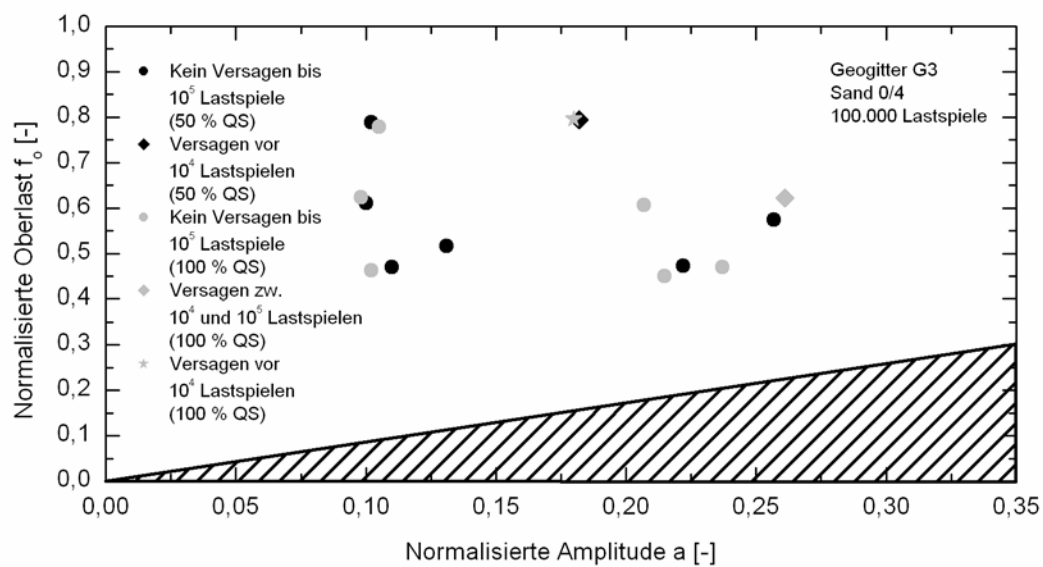


Bild F.13: Extrapoliertes Versagensverhalten zyklischer Modellversuche bei Geogitter G3

G Entwicklung eines Bemessungskonzeptes

G.1 Informationen zum Data Mining

Annahmen: Die allgemeine Versagensgerade liegt vor; Bemessungsnomogramm und Verformungsbeziehungen liegen nicht vor.

Im Folgenden wird eine detaillierte Darstellung möglicher Kombinationen von statischen und zyklischen Modellversuchen gegeben.

Statische Versuche		Ein Versuch (mit gleicher Einbindelänge und Auflast wie zyklische(r) Versuch(e))	
Zyklische Versuche	Kein Versuch		Versuchsmatrix
Kein Versuch	Fall 1	Fall 2	Fall 3
	$F_p(\sigma, l_e)$ (Abschätzverfahren mit angenommenem f_{sg})	F_p und s_p für diese stat. Komb.; für andere Komb.: $F_p(\sigma, l_e)$ Abschätzverfahren	$F_p(\sigma, l_e); s_p(\sigma, l_e)$ (Versuchsbasiertes Verfahren)
	l_{opt} durch Iteration Nomogrammerstellung; s_{zykl} mit Abschätzverfahren	l_{opt} durch Iteration Nomogrammerstellung; s_{zykl} mit Abschätzverfahren	l_{opt} durch Iteration Nomogrammerstellung; s_{zykl} mit Abschätzverfahren
Ein Versuch mit einer Einwirkungskombination	Fall 4	Fall 5	Fall 6
	$F_p(\sigma, l_e)$ (Abschätzverfahren mit angenommenem f_{sg})	F_p und s_p für diese stat. Komb.; für andere Komb.: $F_p(\sigma, l_e)$ Abschätzverfahren	$F_p(\sigma, l_e); s_p(\sigma, l_e)$ (Versuchsbasiertes Verfahren)
	s_{zykl} für diese zykl. Komb.; für andere Komb.: s_{zykl} mit Abschätzverfahren; l_{opt} durch Iteration Nomogrammerstellung	s_{zykl} und Versagensaus-sage für diese zykl. Komb.; für andere Komb.: s_{zykl} mit Abschätzverfahren; l_{opt} durch Iteration Nomogrammerstellung	s_{zykl} und Versagensaus-sage für diese zykl. Komb.; für andere Komb.: s_{zykl} mit Abschätzverfahren; l_{opt} durch Iteration Nomogrammerstellung
Mehrere Versuche mit mehreren Einwirkungskombinationen (mit einer konstanten Einbindelänge und einer konstanten Auflast)	Fall 7	Fall 8	Fall 9
	$F_p(\sigma, l_e)$ (Abschätzverfahren mit angenommenem f_{sg})	F_p und s_p für diese stat. Komb.; für andere Komb.: $F_p(\sigma, l_e)$ Abschätzverfahren	$F_p(\sigma, l_e); s_p(\sigma, l_e)$ (Versuchsbasiertes Verfahren)
	s_{zykl} für alle zykl. Komb. l_{opt} durch Iteration Nomogrammerstellung	s_{zykl} und Versagensaus-sage für alle zykl. Komb. l_{opt} durch Iteration und Nomogrammerstellung mit genauer Versagensgerade	s_{zykl} und Versagensaus-sage für alle zykl. Komb. l_{opt} durch Iteration und Nomogrammerstellung mit genauer Versagensgerade

Bei den grau hinterlegten Fällen handelt es sich um allgemeine Standardvorgehensweisen. Werden zusätzlich detaillierte Informationen zu Versuchen mit bestimmten Eingangsparametern gefordert, so sind entsprechend die verbleibenden Fälle anzuwenden.

Erläuterung der einzelnen Fallbeispiele zum Data Mining

Fall	1	2	3
Beschreibung	Keine Durchführung von Versuchen, sondern lediglich Anwendung der Versagengeraden. Variation von F_p mit dem Abschätzverfahren möglich.	Durchführung eines statischen Versuches zur Ermittlung von F_p und s_p für eine Kombination von σ und l_e .	Durchführung einer statischen Versuchsmatrix zur Ermittlung von F_p und s_p in Abhängigkeit von σ und l_e .
Datenermittlung stat.	$F_p = 2 \times \sigma \times l_e \times f_{s,g}$ s_p nicht ermittelbar; sehr grobe Abschätzung möglich.	F_p und s_p für eine Kombination von σ und l_e . Abschätzverfahren für $F_p(\sigma, l_e)$; eventuell Kalibrierung des Abschätzverfahrens möglich	F_p und s_p für beliebige Kombinationen von σ und l_e (Versuchsbasiertes Verfahren)
Datenermittlung zykl.	Allgemeingültige Versagensgerade vorhanden.	Allgemeingültige Versagensgerade vorhanden.	Allgemeingültige Versagensgerade vorhanden.
Verformungsaussagen	Allgemeine Verformungsermittlung mit Abschätzverfahren	s_{start} für eine Kombination von σ und l_e . Allgemeine Verformungsermittlung mit Abschätzverfahren	s_{start} für beliebige Kombinationen von σ und l_e . Allgemeine Verformungsermittlung mit Abschätzverfahren
Bemessungsaussagen	Iterative Ermittlung von l_{opt} durch Variation von F_p im Abschätzverfahren möglich. Nomogrammentwicklung möglich.	Iterative Ermittlung von l_{opt} durch Variation von F_p im Abschätzverfahren möglich. Nomogrammentwicklung möglich.	Ermittlung von l_{opt} für beliebige Kombinationen von σ und l_e . Nomogrammentwicklung möglich.
Anmerkungen	Dieser Fall eignet sich aufgrund der Unzulänglichkeiten in der genauen Abschätzung von F_p über das Abschätzverfahren nur für grobe Überschlagsberechnungen. Theoretisch stehen alle Daten zu einer Entwicklung der Bemessungsnomogramme zur Verfügung. Eine erste Abschätzung der Bemessung ist bei Verwendung vieler Annahmen möglich.	Dieser Fall eignet sich ebenfalls für eine grobe Überschlagsberechnung. Die Genauigkeit von F_p sollte durch Kalibrierung gegenüber Fall 1 ansteigen. Theoretisch stehen alle Daten zu einer Entwicklung der Bemessungsnomogramme zur Verfügung.	Bei Durchführung von mindestens 5 statischen Versuchen ist eine Aussage über F_p und damit l_{opt} in Abhängigkeit von Tiefe und Einbindelänge möglich. Ausgehend von der allgemeinen Versagengeraden ist die Entwicklung von Bemessungsnomogrammen möglich. Gegenüber Fall 1 und 2 ergibt sich eine Steigerung der Prognosequalität durch exaktere Berechnung von F_p mit dem versuchsbasierten Verfahren.

Fall	4	5	6
Beschreibung	Durchführung eines zyklischen Versuches für eine bestimmte Parameterkombination. Variation von F_p mit dem Abschätzverfahren möglich.	Durchführung eines Versuchspaares für <u>eine</u> Einbindelänge in <u>einer</u> Tiefe.	Durchführung einer statischen Versuchsmatrix zur Ermittlung von F_p und s_p in Abhängigkeit von σ und l_e mit einem zyklischen Versuch.
Datenermittlung stat.	$F_p = 2 \times \sigma \times l_e \times f_{s,g}$ s_p nicht ermittelbar; sehr grobe Abschätzung möglich.	F_p und s_p für eine Kombination von σ und l_e . Abschätzverfahren für $F_p(\sigma, l_e)$; eventuell Kalibrierung des Abschätzverfahrens möglich	F_p und s_p für beliebige Kombinationen von σ und l_e (Versuchsbasiertes Verfahren)
Datenermittlung cykl.	Allgemeingültige Versagensgerade vorhanden. Verformungsdaten für eine Einwirkungskombination vorhanden.	Allgemeingültige Versagensgerade vorhanden. Verformungsdaten für eine Einwirkungskombination vorhanden.	Allgemeingültige Versagensgerade vorhanden. Verformungsdaten für eine Einwirkungskombination vorhanden.
Verformungsaussagen	s_{start} und s_{zykl} sind für eine Einwirkungskombination vorhanden. Allgemeine Verformungsermittlung mit Abschätzverfahren.	s_{start} und s_{zykl} sind für eine Einwirkungskombination vorhanden. Allgemeine Verformungsermittlung mit Abschätzverfahren.	s_{start} und s_{zykl} sind für eine Einwirkungskombination vorhanden. Allgemeine Verformungsermittlung mit Abschätzverfahren.
Bemessungsaussagen	Iterative Ermittlung von l_{opt} über Variation von F_p im Abschätzverfahren möglich. Nomogrammentwicklung möglich.	Gesicherte Versagensaussage für eine Kombination von σ und l_e . Iterative Ermittlung von l_{opt} durch Variation von F_p im Abschätzverfahren möglich. Für eine zyklische Einwirkungskombination ist eine konkrete Versagensaussage möglich. Nomogrammentwicklung möglich.	Ermittlung von l_{opt} für beliebige Kombinationen von σ und l_e . Für eine zyklische Einwirkungskombination ist eine konkrete Versagensaussage möglich. Nomogrammentwicklung möglich.
Anmerkungen	Zusätzlich zu Fall 1 sind begrenzte Verformungsaussagen für <u>eine</u> Einwirkungskombination mit <u>einer</u> Länge in <u>einer</u> Tiefe möglich. Dieser Fall ist nur bei Ermittlung der Verformungen für eine spezielle zyklische Einwirkungskombination von Interesse.	Zusätzlich zu Fall 2 ist eine begrenzte Verformungs- und Versagensaussage für <u>eine</u> Einwirkungskombination mit <u>einer</u> Länge in <u>einer</u> Tiefe möglich. Verformungs- und Versagensaussagen einer bestimmten zyklischen Einwirkungskombination sind von Interesse. Entsprechende Eingangsparameter müssen im Vorfeld abgeschätzt werden können.	Zusätzlich zu Fall 3 ist eine begrenzte Verformungs- und Versagensaussage für <u>eine</u> Einwirkungskombination mit <u>einer</u> Länge in <u>einer</u> Tiefe möglich. Verformungs- und Versagensaussagen einer bestimmten zyklischen Einwirkungskombination sind von Interesse. Entsprechende Eingangsparameter müssen im Vorfeld abgeschätzt werden können.

Fall	7	8	9
Beschreibung	Durchführung von zyklischen Versuchen zur Ermittlung von s_{zykl} bei unterschiedlichen Einwirkungskombinationen. Variation von F_p mit dem Abschätzverfahren möglich.	Durchführung von zyklischen Versuchen zur Ermittlung von s_{zykl} bei unterschiedlichen Einwirkungskombinationen. Absicherung von F_p und s_p mit einem statischen Referenzversuch.	Durchführung von zyklischen Versuchen zur Ermittlung von s_{zykl} bei unterschiedlichen Einwirkungskombinationen mit Absicherung von F_p und s_p in Abhängigkeit von σ und l_e durch eine statische Versuchsmatrix.
Datenermittlung stat.	$F_p = 2 \times \sigma \times l_e \times f_{s,g}$ s_p nicht ermittelbar; sehr grobe Abschätzung möglich.	F_p und s_p für eine Kombination von σ und l_e . Abschätzverfahren für $F_p(\sigma, l_e)$; eventuell Kalibrierung des Abschätzverfahrens möglich	F_p und s_p für beliebige Kombinationen von σ und l_e . (Versuchsbasiertes Verfahren)
Datenermittlung cykl.	Allgemeingültige Versagensgerade vorhanden. Zyklische Daten für mehrere Einwirkungskombinationen vorhanden.	Allgemeingültige Versagensgerade vorhanden. Zyklische Daten für mehrere Einwirkungskombinationen vorhanden.	Allgemeingültige Versagensgerade vorhanden. Zyklische Daten für mehrere Einwirkungskombinationen vorhanden.
Verformungsaussagen	s_{start} ist für alle durchgeführten Einwirkungskombinationen ermittelbar. s_{zykl} ist allgemeingültig bestimmbar.	s_{start} und s_{zykl} sind allgemeingültig bestimmbar.	s_{start} und s_{zykl} sind allgemeingültig bestimmbar.
Bemessungsaussagen	Iterative Ermittlung von l_{opt} über Variation von F_p im Abschätzverfahren möglich. Nomogrammentwicklung möglich.	Genaue Bestimmung der individuellen Versagensgerade möglich. Iterative Ermittlung von l_{opt} durch Variation von F_p im Abschätzverfahren möglich. Nomogrammentwicklung möglich.	Genaue Bestimmung der individuellen Versagensgerade möglich. Nomogrammentwicklung möglich.
Anmerkungen	Zusätzlich zu Fall 1 sind Verformungsaussagen in Abhängigkeit der Einwirkungskombinationen für <u>eine</u> Länge in <u>einer</u> Tiefe möglich. Dieser Fall ist bei ausschließlichem Interesse an Verformungsdaten anzuwenden.	Zusätzlich zu Fall 2 sind allgemeingültige Verformungs- und Versagensaussagen in Abhängigkeit der Einwirkungskombinationen für <u>eine</u> Länge in <u>einer</u> Tiefe möglich. Mit diesen Daten ist die Aufstellung materialspezifischer Verformungsgleichungen möglich. Im Unterschied zu Fall 7 lässt sich durch Kenntnis von s_p jetzt auch s_{start} unabhängig der tatsächlich durchgeführten Versuche bestimmen. Versagensgeraden lassen sich speziell für die untersuchten Materialien ermitteln.	Zusätzlich zu Fall 3 sind allgemeingültige Verformungs- und Versagensaussagen in Abhängigkeit der Einwirkungskombinationen für <u>eine</u> Länge in <u>einer</u> Tiefe möglich. Mit diesen Daten ist die Aufstellung materialspezifischer Verformungsgleichungen möglich. Versagensgeraden lassen sich speziell für die untersuchten Materialien ermitteln. Zusätzlich kommt es zu einer Steigerung der Prognosequalität durch exaktere Berechnung von F_p mit dem versuchsbasierten Verfahren.

G.2 Konstruktion eines Bemessungsnomogramms

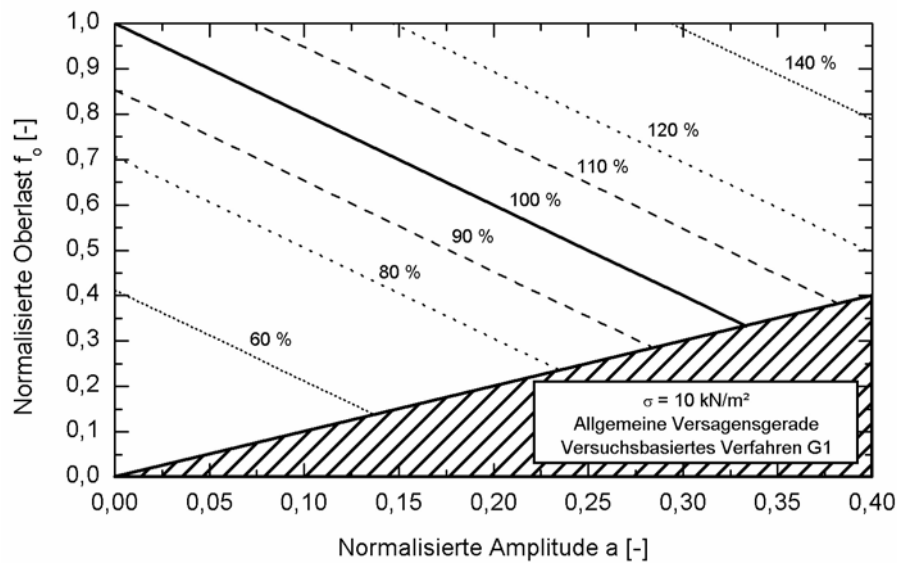


Bild G.1: Bemessungsnomogramm für das Geogitter G1 im Sand bei einer Auflast von $\sigma = 10 \text{ kN/m}^2$ auf der Grundlage der Datenbasis des Falls 3

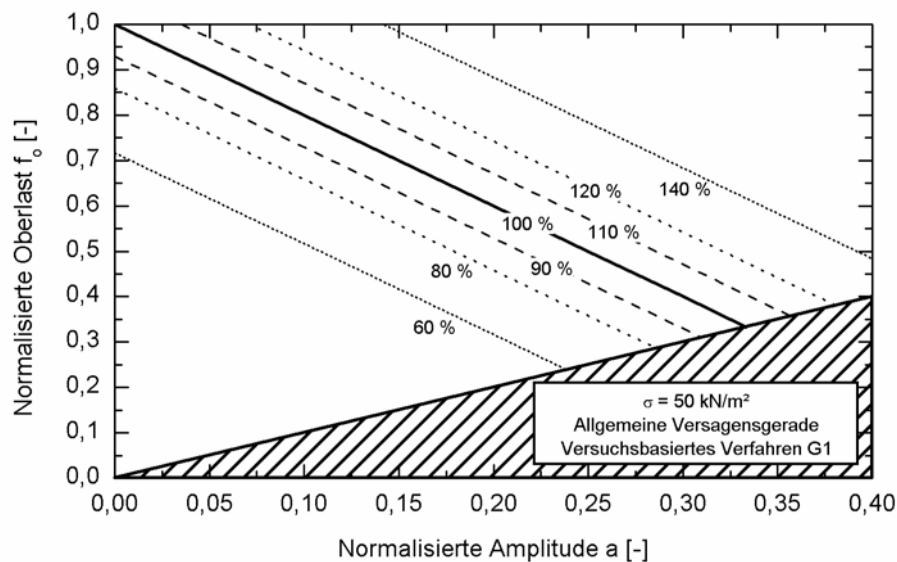


Bild G.2: Bemessungsnomogramm für das Geogitter G1 im Sand bei einer Auflast von $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ auf der Grundlage der Datenbasis des Falls 3

G.3 Bemessungsbeispiel

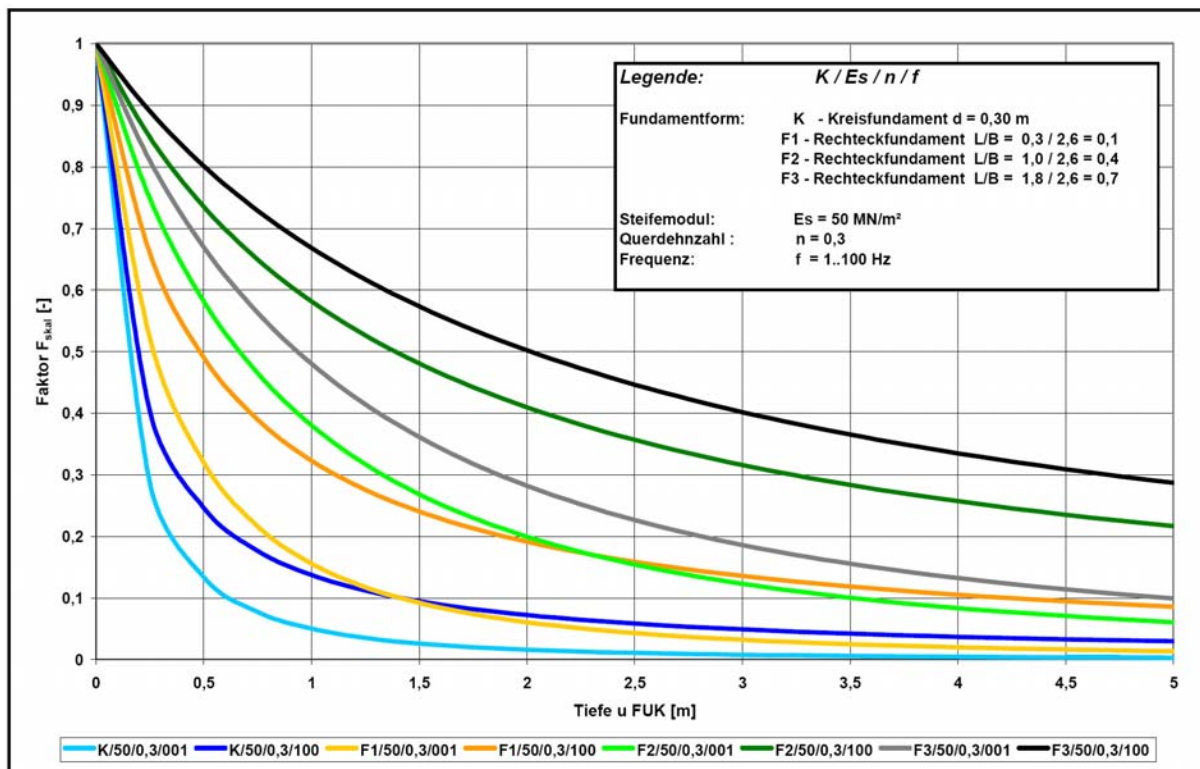


Bild G.3: Abnahmefunktionen der Vertikalspannungen bei einer Frequenzvariation, aus Herold und Tamáskovics (2004)

